

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа _____ ИШНПТ _____
Направление подготовки _____ 11.04.04_Электроника и наноэлектроника _____
Отделение школы _____ Отделение материаловедения _____

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

| Тема работы |
|--|
| Исследование физических процессов формирования интенсивных потоков плазмы на основе сильноточного вакуумного дугового разряда применительно к Z-пинчам |
| УДК _533.92:537.52-047.37__ |

Студент

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|-----------------------------|---------|------|
| 4НМ61 | Дятлов Александр Викторович | | |

Руководитель

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------|--------------|------------------------|---------|------|
| ст. науч. сотр. | Русских А.Г. | к.ф.-м.н. | | |

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|----------------|------------------------|---------|------|
| доцент | Старикова Е.В. | к.филос.н | | |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|------------------|------------------------|---------|------|
| профессор | Ахмеджанов Р. Р. | д-р биол. наук | | |

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

| Руководитель ООП | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-------------------------------|--------------|------------------------|---------|------|
| Электроника и наноэлектроника | Яковлев В.Ю. | Профессор, д.ф.-м.н. | | |

Томск – 2018 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

| Код результата | Результат обучения (выпускник должен быть готов) |
|-------------------------------------|---|
| Профессиональные компетенции | |
| P1 | Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроники и нанoeлектроники |
| P2 | Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области электроники и нанoeлектроники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности |
| P3 | Выполнять инженерные проекты с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества производства электроники и нанoeлектроники в условиях жестких экономических и экологических ограничений |
| P4 | Проводить инновационные инженерные исследования в области электроники и нанoeлектроники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов. |
| P5 | Проводить технико-экономическое обоснование проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса |
| P6 | Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы оборудования электроники и нанoeлектроники |
| P7 | Осваивать новое оборудование электроники и нанoeлектроники; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт |
| P8 | Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение оборудования электроники и нанoeлектроники; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы. |
| Универсальные компетенции | |
| P9 | Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности |
| P10 | Свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности. |
| P11 | Использовать на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности. |
| P12 | Использовать представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию. |

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа _____ ИШНПТ _____
Направление подготовки _____ 11.04.04_Электроника и наноэлектроника _____
Отделение школы _____ Отделение материаловедения _____

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
_____ Яковлев В.Ю. _
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

| |
|--------------------------|
| магистерской диссертации |
|--------------------------|

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

| Группа | ФИО |
|--------|-----------------------------|
| 4НМ61 | Дятлов Александр Викторович |

Тема работы:

| | |
|--|----------------------------|
| Исследование физических процессов формирования интенсивных потоков плазмы на основе сильноточного вакуумного дугового разряда применительно к Z-пинчам | |
| Утверждена приказом директора (дата, номер) | от 03.12.2016 г. № 10467/с |

| | |
|--|------------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 05.06.2018 |
|--|------------|

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

| | |
|---|---|
| Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i> | Объект исследования: физические процессы, протекающих в приповерхностном слое металлических электродов и в прилегающей к ней области в условиях повышенной плотности тока и общей энергетики; условия формирования самопинчующихся плазменных струй. |
| Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i> | Аналитический обзор литературных источников с целью определения методов исследования, реализации прогнозированной модели в программном обеспечении, исследование условия формирования самопинчующихся плазменных струй. |
| Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i> | Презентация |

| Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы | |
|---|--------------------|
| Раздел | Консультант |
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | Старикова Е.В. |
| Социальная ответственность | Ахмеджанов Р.Р. |
| Раздел на иностранном языке | Парнюгин А.С. |
| Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках: | |
| Экспериментальная установка и диагностическая аппаратура | |
| Условия и схемы экспериментов | |
| Обсуждение полученных результатов. | |
| Теоретическое обоснование процессов пинчевания плазменного столба. | |
| Определение эрозии алюминиевого катода вакуумного дугового разряда на основе радиографических данных. | |
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | |
| Социальная ответственность | |
| Заключение | |
| Раздел на иностранном языке | |

| | |
|---|--|
| Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику | |
|---|--|

Задание выдал руководитель:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------|--------------|------------------------|---------|------|
| ст. науч. сотр. | Русских А.Г. | к.ф.-м.н. | | |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|-----------------------------|---------|------|
| 4НМ61 | Дятлов Александр Викторович | | |

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 121 с., 24 рис., 14 табл., 29 источников, 1 прил.

Ключевые слова: z-пинч, rz-пинч, рентгеновская радиография, плазма, дуговой разряд, пинч-эффект.

Объектом исследования являются физические процессы, протекающие в приповерхностном слое металлических электродов и в прилегающей к ней области в условиях повышенной плотности тока и общей энергетики; условия формирования самопинчующихся плазменных струй;

Цель работы заключается в создании новых технологий формирования плазменной оболочки Z-пинча и совершенствовании уже достигнутых преимуществ использования вакуумных дуговых разрядов при формировании лайнерных структур необходимой конфигурации и имеющих изначально высокую проводимость.

В процессе исследования проводился ряд экспериментов на установке ИМРИ-5, был произведён анализ и обработка полученных данных.

В результате исследования был совершен анализ радиографических изображений плазменных струй, полученных с помощью рентгеновского радиографа на основе X-пинча, результаты экспериментов представлены в виде осциллограмм и сделаны выводы о проделанных опытах.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: основными особенностями вакуумных дуговых разрядов, исследованию которых и посвящена данная работа, является повышенный уровень тока вакуумной дуги (до 350 кА) при времени фронта тока около 500 нс. Кроме того, поскольку вакуумных дуговой разряд происходит в коаксиальной линии, возникают условия для

самопинчевания плазменного факела, что привит к ряду физических эффектов, рассмотренных в данной диссертационной работе.

Степень внедрения: Результаты исследований, приведенные в данной диссертационной работе, используются при проектировании узлов нагрузки сильноточных генераторов в которых в качестве рабочего вещества используются плазменные потоки, состоящие из различных металлов.

Область применения: Фундаментальные и научно-технические исследования в области физики плазмы.

Экономическая эффективность/значимость работы: Результаты, полученные при проведении исследовательской работы, представленной в данной диссертации, лежат в основе новейших научно-технических разработок, таких как импульсный рентгеновский радиограф на основе PZ-пинчей, который представляет, как научный, так и чисто коммерческий интерес.

В будущем планируется проведение расширенных и более детальных исследований физических процессов, происходящих при инициации и горении вакуумных дуговых разрядов, а также расширение внедренческой составляющей данного направления.

Оглавление

| | |
|--|----------------|
| Введение..... | 11 стр. |
| Актуальность исследования..... | 12 стр. |
| Цель исследования | 13 стр. |
| 1. Глава 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА..... | 14 стр. |
| 1.1. Описание и схема генератора тока ИМРИ-5..... | 14 стр. |
| 1.2. Описание диагностики, использованной при проведении экспериментов на генераторе ИМРИ-5..... | 16 стр. |
| 1.2.1. Активный делитель напряжения..... | 18 стр. |
| 1.2.2. Индуктивная петля..... | 19 стр. |
| 1.2.3. Пояс Роговского..... | 20 стр. |
| 1.2.4. Схема регистрации оптического изображения плазменной струи на оптическую 4-х кадровую камеру HSFC-Pro..... | 22 стр. |
| 1.2.5. Описание метода рентгеновской радиографии..... | 23 стр. |
| 2. Глава 2. УСЛОВИЯ И СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ..... | 28 стр. |
| 2.1. Схема плазменной пушки №1..... | 28 стр. |
| 2.2. Схема плазменной пушки №2..... | 30 стр. |
| 2.3. Схема плазменной пушки №3..... | 31 стр. |
| 2.4. Схема плазменной пушки №4..... | 32 стр. |
| 3. Глава 3. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.. | 33 стр. |
| 3.1. Результаты полученные при использовании экспериментальной схемы №1..... | 33 стр. |
| 3.2. Результаты полученные при использовании экспериментальной схемы №2..... | 36 стр. |
| 3.3. Результаты полученные при использовании экспериментальной схемы №3..... | 40 стр. |

| | |
|--|----------------|
| 3.4. Результаты полученные при использовании экспериментальной схемы №4..... | 42 стр. |
| 3.5. Определение средней массовой скорости плазменной струи.... | 44 стр. |
| 4. Глава 4. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПИНЧЕВАНИЯ ПЛАЗМЕННОГО СТОЛБА..... | 46 стр. |
| 4.1. Критерий пинчевания в условиях характерных для плазмы дугового разряда..... | 46 стр. |
| 5. Глава 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭРОЗИИ АЛЮМИНИЕВОГО КАТОДА ВАКУУМНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА НА ОСНОВЕ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ..... | 47 стр. |
| 6. Глава 6. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ..... | 52 стр. |
| 6.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения..... | 53 стр. |
| 6.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования..... | 53 стр. |
| 6.2. SWOT-анализ..... | 54 стр. |
| 6.3. Планирование этапов и выполнения работ проводимого научного исследования..... | 58 стр. |
| 6.3.1 Структура работ в рамках научного исследования..... | 58 стр. |
| 6.3.2. Планирование этапов и выполнения работ проводимого научного исследования..... | 60 стр. |
| 6.3.2.1. Структура работ в рамках научного исследования..... | 60 стр. |
| 6.3.2.2. Разработка графика проведения научного исследования..... | 61 стр. |

| | |
|--|----------------|
| 6.4. Бюджет научного исследования..... | 65 стр. |
| 6.4.1. Расчет материальных затрат научного исследования..... | 65 стр. |
| 6.4.2. Основная заработная плата научно-производственного персонала..... | 67 стр. |
| 6.4.3. Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала..... | 70 стр. |
| 6.4.4. Отчисления на социальные нужды..... | 71 стр. |
| 6.4.5. Накладные расходы..... | 71 стр. |
| 6.4.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта..... | 72 стр. |
| Глава 7. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ..... | 77 стр. |
| Введение..... | 77 стр. |
| 7.1. Производственная безопасность..... | 78 стр. |
| 7.1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения..... | 79 стр. |
| 7.1.1.1. Электромагнитное излучение..... | 79 стр. |
| 7.1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения..... | 81 стр. |
| 7.1.2.1. Электрический ток..... | 81 стр. |
| 7.1.2.2. Пожар..... | 83 стр. |
| 7.2. Экологическая безопасность..... | 85 стр. |
| 7.2.1. Защита селитебной зоны..... | 85 стр. |

| | |
|--|----------|
| 7.2.2. Защита атмосферы..... | 89 стр. |
| 7.2.3. Защита гидросферы..... | 90 стр. |
| 7.2.4. Защита литосферы..... | 91 стр. |
| 7.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях..... | 93 стр. |
| 7.3.1. Поражение электрическим током..... | 93 стр. |
| 7.3.2. Затопление..... | 93 стр. |
| 7.3.3. Пожар..... | 94 стр. |
| 7.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности..... | 96 стр. |
| 7.4.1. Специальные правовые нормы трудового законодательства.... | 96 стр. |
| 7.4.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны..... | 97 стр. |
| Заключение..... | 102 стр. |
| Библиографический список..... | 103 стр. |
| Приложение А..... | 107 стр. |

Введение

Предварительные эксперименты, проведенные с сильноточным (~70 кА) вакуумным дуговым разрядом указывают на то, что профиль плотности вещества, сублимированного с поверхности катода, и распространяющегося в вакуумный промежуток, представляет собой вытянутую “стержнеобразную” форму. Этот экспериментально зарегистрированный факт свидетельствует о частичном захвате тока дуги распространяющейся плазмой. Поскольку захват тока плазменным потоком должен влиять на формирование структуры самого плазменного потока, то это может иметь важное значение для реализации проектов формирования оболочек Z-пинчей с локализацией вещества на центре лайнерных систем при значительной их длине. Другой экспериментально зарегистрированный факт состоит в том, что при плотности тока свыше $\sim 2.5 \cdot 10^5$ А/см² наблюдается аномально большая масса испаренного вещества катода. Данный факт позволяет надеяться на то, что технология формирования плазменных лайнеров будет применима не только на установках малого и среднего уровня токов (до 1 МА), но и на генераторах мультимегаамперного уровня. Схемы и методы диагностики, использованные при проведении данных экспериментов, помогут понять и охарактеризовать те физические процессы, которые происходят при формировании сильноточных вакуумных дуговых разрядов и направленных плазменных струй.

Актуальность исследования

Исследование структуры образования и горения катодных пятен в условиях повышенных токов вакуумного дугового разряда (свыше 50 кА) в режиме коротких фронтов тока дуги (~ 1.5 мкс и менее) имеет очень важное значение из-за нарушения однородности горения катодных пятен и генерации плазмы. В условиях повышенных скоростей роста тока и плотности тока дугового разряда, одним из определяющих факторов может становиться скорость дрейфа магнитного поля в высокопроводящей среде плазменного потока. Поскольку характерное время процесса генерации плазмы становятся соизмеримыми с временем формирования структуры плазменного потока, то в этих условиях логично ожидать появления специфичных «трубчатых» структур за счет частичной экранировки внутренней поверхности катода проводящей средой самого плазменного факела. Актуальность результатов во многом определяется оригинальностью новых подходов к исследованию процесса формирования плазменного потока с поверхности электродов, в условиях дугового разряда с повышенной плотностью тока, а именно рентгеновской радиографии с разрешением по времени около 1 нс и с пространственным разрешением в несколько микрон. Эта диагностика широко используется более 10 лет в различных лабораториях мира [1]-[12] для производства высококачественных рентгеновских изображений с превосходными пространственными и временными разрешениями. Появление возможности использования столь мощного исследовательского инструмента позволит получить новые данные о плазменных объектах, диагностика которых другими методами затруднительна.

Цель исследования

Цель данной диссертационной работы заключается в создании новых технологий формирования плазменной оболочки Z-пинча и совершенствовании уже достигнутых преимуществ использования вакуумных дуговых разрядов при формировании лайнерных структур необходимой конфигурации и имеющих изначально высокую проводимость.

Задачами настоящей диссертационной работы являются:

- 1 – детальное изучение физических процессов, протекающих в приповерхностном слое металлических электродов и в прилегающей к ней области в условиях повышенной плотности тока и общей энергетики;
- 2 – исследование условий формирования самопинчующихся плазменных струй;

Глава 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА.

1.1. Описание и схема генератора тока ИМРИ-5

Сильноточный генератор тока ИМРИ-5 представляет собой емкостной накопитель энергии с суммарной емкостью конденсаторной батареи $C_0 = 3.2$ мкФ. При номинальном напряжении зарядки конденсаторов $V_0 = 70$ кВ запасенная энергия составляет 7.84 кДж, что в режиме короткого замыкания обеспечивает ток через нагрузку с амплитудой до 480 кА и временем нарастания 550 нс. Коммутация запасенной энергии осуществляется с помощью многозачерного плоского разрядника разработанного сотрудниками Отдела Импульсной Техники ИСЭ СО РАН [13]. Электрическая схема генератора тока ИМРИ-5 показана на рис. 1. Индуктивность и внутреннее сопротивление контура ИМРИ-5 рассчитывались из осциллограмм тока (см. рис. 2) полученных в режиме короткого замыкания.

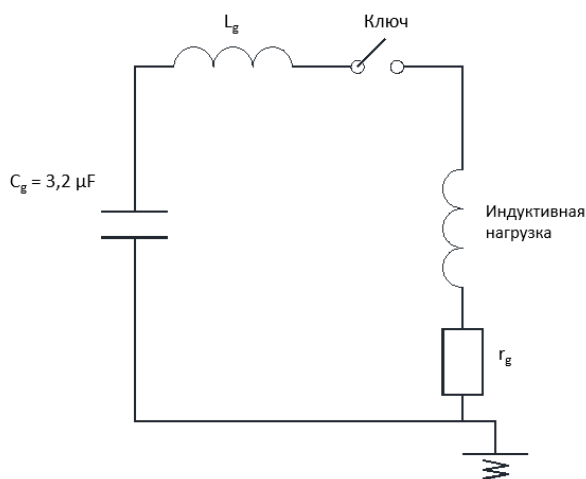


Рис. 1. Электрическая схема генератора тока ИМРИ-5

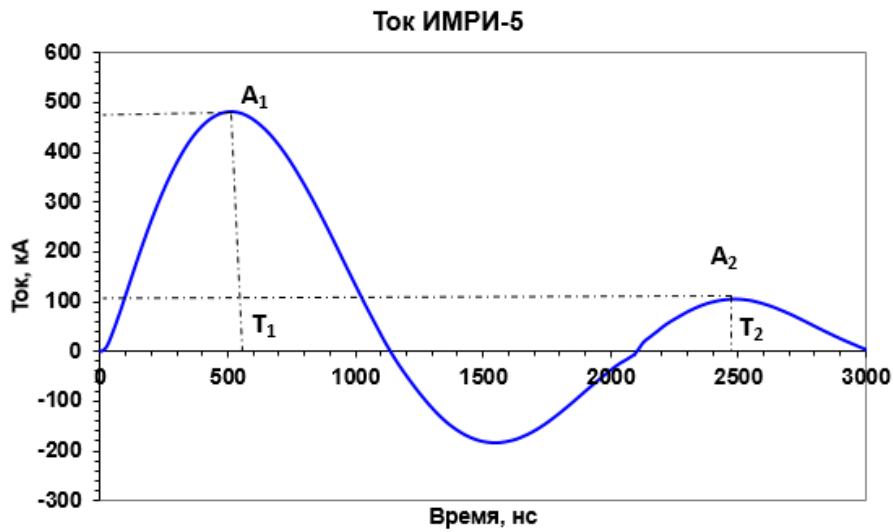


Рис. 2. Осциллограмма тока, полученная в режиме короткого замыкания

Для расчета индуктивности основного контура было использовано следующее выражение [14]:

$$L = \frac{1}{c \left(\frac{4\pi^2}{T^2} + \beta^2 \right)}, \quad (1)$$

где β – коэффициент затухания, который равен

$$\begin{aligned} \beta &= (T_2 - T_1)^{-1} \ln \frac{A_1}{A_2} = (1963 * 10^{-9})^{-1} \ln \frac{477 * 10^3}{103 * 10^3} = 5,094 * 10^5 * 1,533 = \\ &= 7,808 * 10^5 \end{aligned} \quad (2)$$

Исходя из этого,

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{3,2 * 10^{-6} \left(\frac{4\pi^2}{(1963 * 10^{-9})^2} + (7,808 * 10^5)^2 \right)} = \\ &= \frac{1}{3,2 * 10^{-6} * 1,084 * 10^{13}} = \frac{1}{3,47 * 10^7} = 2,88 * 10^{-8} \text{ Гн} = \\ &= 28,8 * 10^{-9} \text{ Гн} = 28,8 \text{ нГн} \end{aligned}$$

Внутреннее сопротивление контура равно

$$R = 2\beta L = \quad (3)$$

$$= 2 * 7.808 * 10^5 * 28.8 * 10^{-9} = 44.97 * 10^{-3} \text{ Ом} = 44,97 \text{ мОм}$$

Технические параметры генератора тока ИМРИ-5:

Время нарастания импульса тока – 550 нс.

Частота повторений импульса тока – однократный.

Амплитуда импульса тока – 480 кА.

Индуктивность основного контура $L = 28.8 \text{ нГн}$.

Внутреннее сопротивление контура ИМРИ-5 $R = 45 \text{ мОм}$.

1.2. Описание диагностики, использованной при проведении экспериментов на генераторе ИМРИ-5

В экспериментах была использована следующая электрофизическая диагностика:

1. Для измерения полного тока генератора тока ИМРИ-5 $I_g(t)$ использовался пояс Роговского RC_1 (1040 витков, нагруженных на шунт с сопротивлением $r_{sh1} = 0.196 \text{ }\Omega$) расположенный в плоском фланце обратного токопровода ИМРИ-5 (см. рис. 3);

2. Для вычисления производной полного тока генератора ИМРИ-5 $\frac{dI_g(t)}{dt}$, регистрировался сигнал индуктивной петли (1 виток диаметром 8 мм), расположенный в коаксиальной части обратного токопровода (см. рис. 3);

3. Падение напряжения $V(t)$ в области, прилегающей к месту расположения дугового разряда, было измерено с помощью активного делителя напряжения (см. рис. 3).

4. Для измерения части тока генератора, захваченного плазменным потоком дугового разряда $I_{arc}(t)$ использовался пояс Роговского RC2 (218 витков, нагруженных на шунт с сопротивлением $r_{sh1} = 0.198 \Omega$) расположенный в плоском фланце обратного токопровода дугового разряда (см. рис. 3);

5. Для измерения производной части тока генератора, захваченного плазменным потоком дугового разряда $dI_{arc}(t)/dt$, использовался набор из трех индуктивных петель B-dot₁- B-dot₃. Петли располагались вдоль оси столба плазмы.

6. Изображение собственного свечения плазменной струи регистрировалось с помощью 4-кадровой оптической камеры HSCF-Pro с экспозицией 3 нс и временем между кадрами 40 нс.

7. Исследование распределения вещества, а также погонной и общей массы вещества в плазменной струе проводилось с использованием компактного рентгеновского радиографа XPG [15] (амплитуда тока 250 кА и время нарастания 220 нс) с нагрузкой в виде X-пинча. X-пинч представлял собой четыре молибденовые проволоочки диаметром 25 мкм скрученные в виде буквы X. Ток X-пинча измерялся с помощью пояса Роговского. Рентгеновское излучение X-пинча регистрировалось рентгеновским диодом с медным катодом (XDR), расположенным за фильтром из майлара толщиной 12 мкм что обеспечивало чувствительность детектора в спектральной области $h\nu > 0.8$ кэВ.

8. Оптическое изображение плазменной струи вакуумного дугового разряда в различные моменты времени регистрировалось с помощью четырех-кадровой оптической камеры HSFC-Pro.

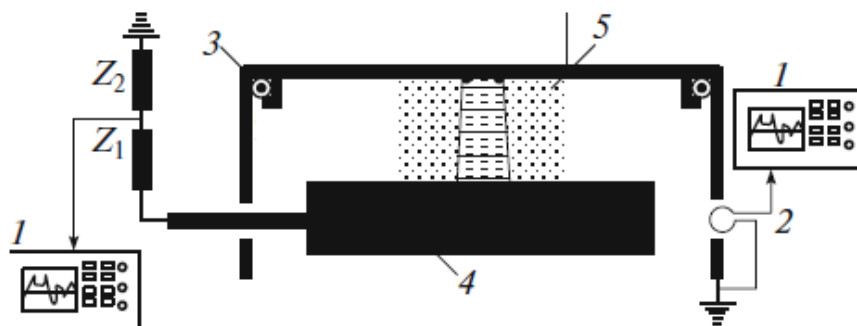


Рис. 3. Принципиальная схема нагрузки и расположения датчиков тока и напряжения: (1) – осциллограф, (2) – индуктивная петля, (3) – пояс Роговского, (4) – высоковольтный электрод генератора тока ИМРИ-5, (5) – оболочка лайнера, Z_1 , Z_2 – активный делитель напряжения.

1.2.1. Активный делитель напряжения

Для регистрации падения напряжения на дуговом разряде, во время протекания через него тока генератора ИМРИ-5, был использован активный делитель напряжения.

Важной характеристикой делителя напряжения является временное разрешение. Временное разрешение - это определенный временной параметр τ , характеризующий отклик вольтметра от прямоугольного импульса. Значение этого параметра становится понятно из следующего аналитического выражения, описывающего фронт регистрируемого напряжения для первоначального прямоугольного импульса напряжения:

$$V_2 = \frac{1}{K_{div}} V_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (4)$$

где V_1 – измеряемое напряжение, а V_2 – напряжение, полученное с осциллографа, K_{div} – коэффициент деления. Величина τ может зависеть от нескольких параметров, таких как емкость и индуктивность соединительных кабелей, паразитная емкость самого делителя, сопротивления, и индуктивности верхнего и нижнего плеча. Оценки показали, что в нашем случае τ определяется в основном отношением индуктивности соединительных проводов $L_d = 1700$ нГн к сопротивлению верхнего плеча $Z_1 = 970$ Ом:

$$\tau \approx \frac{L_d}{Z_1} = \frac{1.7 * 10^{-6}}{970} = 1.7 \text{ нс.} \quad (5)$$

Поскольку измерительная цепь делителя содержит вспомогательные делители напряжения и резистор согласования на осциллографе, необходимо проверить правильность расчета общего коэффициента деления напряжения в измерительной цепи. Для того, чтобы получить объективное значение коэффициента деления, была проведена калибровка всей цепи с помощью калибровочного импульса. Импульс опорного напряжения с амплитудой около 70 В подается на вход делителя. Тот же самый сигнал одновременно подается через параллельный кабель ко второму каналу осциллографа без делителей. Сравнивая эти два сигнала, был получен реальный коэффициент деления ($K_{div} = 7280$) для активного делителя напряжения, который автоматически учитывает все промежуточные стадии затухания и частичные несогласования.

1.2.2. Индуктивная петля

Индуктивная петля представляет собой один виток проводника, залитый в эпоксидную смолу и располагающийся внутри отверстия в обратном токопроводе сильноточного генератора ИМРИ-5. Индуктивная петля служит для вычисления производной тока генератора ИМРИ-5. По законам электромагнитной индукции в контуре, который пересекает

переменный поток магнитного поля $\Phi(t)$ возбуждается ЭДС индукции $\mathcal{E}(t)$ согласно формуле:

$$\varepsilon(t) = \frac{d\Phi}{dt} = S * \frac{dB}{dt}, \quad (6)$$

где S -это площадь петли.

Ток, создающий вокруг себя электромагнитный поток Φ связан с величиной электромагнитной индукции следующим соотношением:

$$B = \frac{\mu\mu_0 2I(t)}{4\pi r}, \quad (7)$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{\mu\mu_0}{2\pi r} \frac{dI(t)}{dt},$$

$$\varepsilon(t) = S * \frac{\mu\mu_0}{2\pi r} \frac{dI(t)}{dt},$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = \frac{\varepsilon(t)2\pi r}{S\mu\mu_0},$$

$$I(t) = \int \frac{dI(t)}{dt} dt = \frac{2\pi r}{S\mu\mu_0} \int \varepsilon(t) dt. \quad (8)$$

Таким образом, зная площадь петли и расстояние от петли до оси протекания тока, можно вычислить и ток. Однако, поскольку существует ряд факторов неопределенности зависящих от геометрии расположения петли и определения ее площади, реальный коэффициент чувствительности петли был определён из совместной калибровки петли и пояса Роговского.

1.2.3. Пояс Роговского

Для измерения полного тока генератора ИМРИ-5, был использован пояс, состоящий из 1040 витков и нагруженный на шунт с сопротивлением

0.196 Ом. Индуктивные петли и пояса Роговского, как правило, калибруются с помощью шунтов с достаточно низким сопротивлением. Основная трудность при таком подходе к калибровке с использованием генератора тока ИМРИ-5 состоит в том, что амплитуда тока генератора слишком велика, и трудно подготовить шунт с достаточно большой мощностью. Кроме того, сопротивление шунта для токов порядка 100 кА должен быть достаточно мало (порядка 1 мОм). Точность измерения такого сопротивления довольно низка. Кроме того, при работе с шунтом с низким сопротивлением, должна учитываться индуктивная составляющая напряжения.

Для того, чтобы избежать трудностей калибровки с помощью шунта, при подготовке экспериментов, была проведена взаимная калибровка индуктивной петли и пояса Роговского. Основные параметры пояса Роговского могут быть измерены с достаточной точностью, за исключением поправки, которая должна быть введена, для того чтобы учесть дифференциальную составляющую сигнала. Тем не менее, принимая во внимание тот факт, что индуктивная петля описывает временные характеристики измеряемого тока достаточно точно, то сопоставляя периоды сигналов с индуктивной петли и пояса Роговского, можно определить поправку к сигналу с пояса Роговского.

Для расчета тока генератора ИМРИ-5 $I_g(t)$ по сигналу $V_{Rog}(t)$, полученного с пояса Роговского, используется следующее уравнение:

$$I_g(t) = \frac{N_{Rog}K_r}{Z_{shunt}K_f} V_{Rog}(t) + K_{RC} \int V_{Rog}(t)dt, \quad (9)$$

где N_{Rog} - число витков в поясе Роговского, K_r - коэффициент ослабления делителей в измерительной цепи, Z_{shunt} - сопротивление шунта на выходе пояса Роговского, K_f - коэффициент заполнения длины

окружности, на которой установлен пояс, и K_{RC} - поправочный коэффициент.

Выбирая коэффициент коррекции K_{RC} , можно достичь согласования периода колебаний тока, полученного путем интегрирования показаний петли, с периодом колебаний тока, зарегистрированного с помощью пояса Роговского. Чувствительность петли $K_{B\dot{}}$ в этом случае определяется из сравнения амплитуды интеграла сигнала петли и амплитуды тока генератора вычисленного по формуле (9). Таким образом, истинное значение тока, можно определить из выражения:

$$I_g(t) = K_{B\dot{}} \int V_{B\dot{}}(t)dt, \quad (10)$$

где $V_{B\dot{}}$ - сигнал индуктивной петли, а $K_{B\dot{}}$ - чувствительность индуктивной петли.

1.2.4. Оптический тракт с регистрацией изображения вакуумного дугового разряда оптической 4-х кадровой камерой HSFC-Pro

Для того чтобы получить представление о динамике формирования плазменного потока вакуумного дугового разряда и убедиться в том, что его геометрические размеры, действительно соответствуют геометрическим размерам, определяемым с помощью электрофизической диагностики, регистрировались изображения плазменного столба с помощью четырех-кадровой оптической камеры HSFC-Pro. В большинстве фотографий, задержка между кадрами составляла 200 нс, а время экспозиции составляло 10 нс. Изображение было сформировано линзой объектива с фокусным расстоянием 30 см. Камера располагалась на расстоянии 167 см от оси плазменного столба. Коэффициент увеличения изображения схемы составляет 0.6.

1.2.5. Описание метода рентгеновской радиографии.

Одним из важнейших параметров оболочки лайнера на стадии формирования является распределение вещества (как по радиусу, так и по его длине). Наиболее информативным методом исследования распределения плотного плазменного потока является импульсная рентгеновская радиография. В качестве источников излучения для рентгеновской радиографии использовалась высокотемпературная плотная плазма X-пинча. Рентгенография на основе X-пинча имеет пространственное разрешение $2 \div 3$ мкм, а временное разрешение составляет около наносекунды. Диагностика в сочетании со ступенчатым ослабителем, изготовленным из того же материала, что и исследуемая плазма, позволяет проводить не только качественный, но и количественный анализ структуры потока плазмы. Распределение плотности плазменного потока чрезвычайно важно, как для математического описания взрыва Z-пинча, так и для изучения основных закономерностей испарения материала электродов при высоковольтном электрическом разряде.

Схема эксперимента по регистрации изображения плазменного потока в области мягкого рентгеновского излучения с использованием радиографа представлена на рис. 4. Радиограф представлял собой компактный сильноточный генератор XPG с нагрузкой в виде X-пинча. Коэффициент увеличения схемы составлял 1.48.

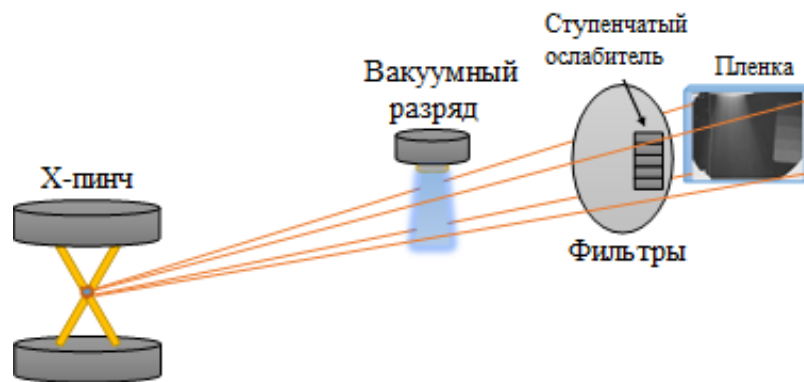


Рис. 4. Схема эксперимента по регистрации радиографического изображения плазменного потока в области мягкого рентгеновского излучения ($\approx 1 \div 2$ кэВ) с использованием радиографа.

Ток X-пинча измерялся поясом Роговского, а производная тока плазменной пушки измерялась индуктивной петлёй. Рентгеновское излучение X-пинча регистрировалось рентгеновским диодом с медным катодом, отфильтрованным в спектральной области $h\nu > 0.8$ кэВ.

Оба генератора были синхронизированы.



Рис.5. Фотография генератора тока ИМРИ-5 вместе с радиографом.

Фотография генератора тока ИМРИ-5 вместе с радиографом показана на рис. 5. Существенной особенностью радиографа является то, нагрузка в виде X-пинча устанавливается в выносную вакуумную камеру, которая связана с генератором тока XPG с помощью гибкой передающей линией, состоящей из 86 коаксиальных кабелей РК-50 диаметром 3 мм каждый. Это техническое решение позволило сочленить вакуумную камеру радиографа (с установленным в ней X-пинчем) с вакуумной камерой генератора тока ИМРИ-5.

В эксперименте на одном снимке одновременно регистрировалось два радиографических изображения: плазменной струи и ступенчатого ослабителя. Типичный снимок представлен на рис. 6. Изображение ступенчатого ослабителя с указанной толщиной ступеней показано на рис. 7. Известно, что плотность почернения пленки D_{film} пропорциональна интенсивности излучения I , прошедшего через слой исследуемого вещества толщиной h .

$$D \propto I \propto I_0 e^{-\mu \rho h}, \quad (11)$$

где ρ и μ – плотность и коэффициент поглощения вещества, через которое прошло излучение. В тех точках, где плотности почернения изображения плазмы D_{pl} и одной из ступеней ослабителя D_{sw} совпадают, выполняется соотношение:

$$\rho_{pl} h_{pl} = \rho_{sw} h_{sw}, \quad (12)$$

где h_{pl} и ρ_{pl} – толщина слоя поглощения и усредненная по толщине слоя плотность исследуемого плазменного объекта, ρ_{sw} и h_{sw} – плотность и толщина ступени ослабителя.

Поскольку фотопленка, на которую попадает излучение, проходящее через одинаковое количество вещества плазмы и ступенчатый ослабитель,

имеют одинаковую плотность почернения, то зная характеристики ступенчатого ослабителя можно определить и поверхностную плотность исследуемого вещества плазмы. Таким образом, радиографическое изображение алюминиевого ступенчатого ослабителя позволяет построить прямую зависимость произведения плотности и толщины слоя поглощения алюминия ρh от плотности почернения пленки D_{film} :

$$\rho h(D_{film}) = aD_{film}^2 + bD_{film} + c, \quad (13)$$

где коэффициенты a , b и c зависят от интенсивности и спектра источника излучения. Поэтому эти коэффициенты должны быть определены в каждом выстреле.

Уравнение (13) представляет собой простой полином второго порядка, описывающий дискретные значения оптической плотности пленки D , расположенной за ступенчатым ослабителем, с использованием элементарной параболической функции.

Очевидно, что коэффициент поглощения зондирующего излучения в веществе зависит от его спектра. Поскольку спектр излучения X-пинча не монохроматичен, оптическая плотность пленки D_{film} является интегральной характеристикой потока излучения прошедшего света либо через исследуемую плазму, либо через ступенчатый ослабитель. Поскольку для расчета плотности и линейной массы плазменного потока не используются абсолютные значения оптической плотности пленки, а проводится только сравнительный анализ оптической плотности пленки в области плазмы и в области ступенчатого ослабителя (в каждом снимке), то выражение (14) справедливо как для монохроматического, так и для немонохроматического зондирующего излучения.

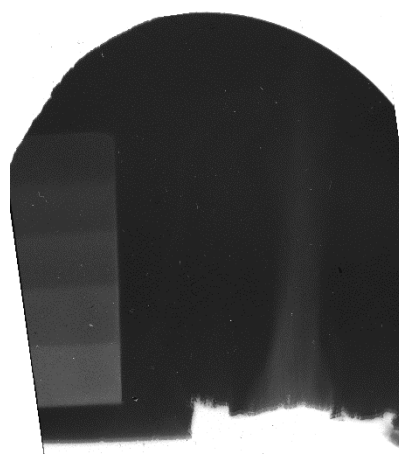


Рис.6. Теневые изображения Al плазмы и ступенчатого ослабителя

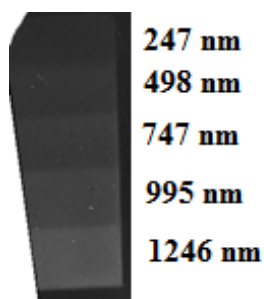


Рис.7. Изображение ступенчатого ослабителя с указанной толщиной ступеней

Линейная масса каждого плазменного слоя была рассчитана путем интегрирования произведения плотности и глубины слоя поглощающего излучения по радиусу с учетом уравнения (13):

$$m_p = 2 \int_0^R \rho h(r) dr, \quad (14)$$

Глава 2. УСЛОВИЯ И СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.

Эксперимент проводился на генераторе ИМРИ-5 (амплитуда импульса тока – 450 кА, время нарастания импульса тока – 450 нс при коротком замыкании). Нагрузкой генератора ИМРИ-5 является плазменная пушка на основе вакуумного дугового разряда [16]-[18]. Устройство плазменной пушки схематично показано на рисунках 8-11. Плазменная пушка представляет собой два коаксиальных электрода расположенных в вакуумной камере и разделенных изолятором толщиной 2.5 мм. Катодом дугового разряда является высоковольтный электрод сильноточного генератора ИМРИ-5. Стержень катода плазменной пушки изготовлен из алюминия. Плазменная струя формируется в межэлектродном промежутке генератора тока ИМРИ-5.

В данных экспериментах были использованы четыре различные модификации узла нагрузки сильноточного генератора ИМРИ-5. Эксперименты проводились в вакуумной камере установки с остаточным давлением не более $5 \cdot 10^{-5}$ торр. Поскольку были использованы алюминиевые электроды дугового разряда, то соответственно в экспериментах получали алюминиевую плазму.

2.1. Схема №I

Схема первой модификации узла нагрузки представлена на рис. 8. Катодом плазменной пушки является высоковольтный электрод генератора ИМРИ-5 в который вмонтирован алюминиевый стержень. В экспериментах были использованы алюминиевые стержни диаметром 3, 5 и 7 мм. При срабатывании генератора ИМРИ-5, происходил пробой по поверхности изолятора (в торцевой части) и затем формировался вакуумный дуговой разряд. Ширина кольцевого полиэтиленового изолятора между катодом и анодом составляла 2.5 мм.

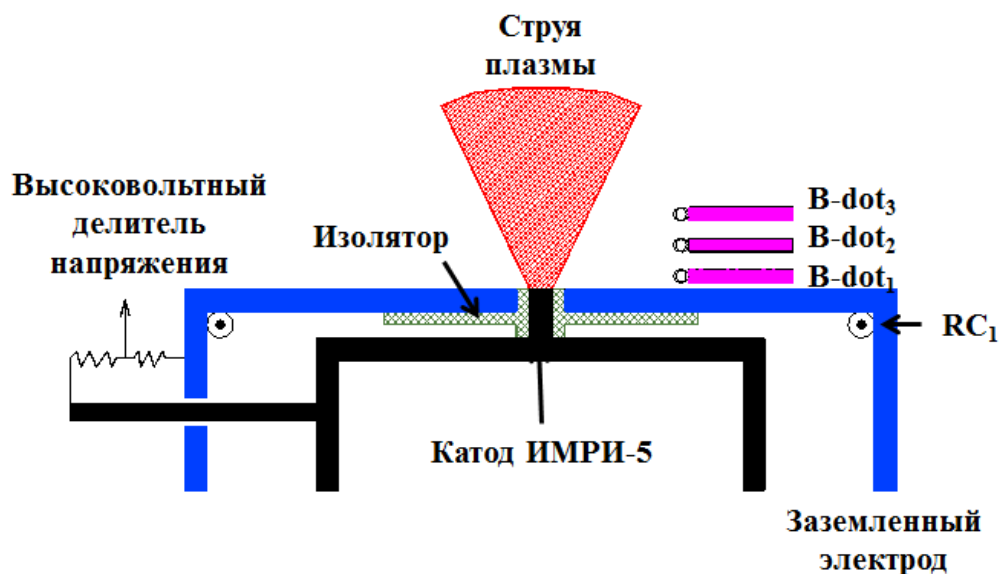


Рис. 8. Схема узла нагрузки сильноточного генератора ИМРИ-5 №1.
 RC_1 - пояс Роговского, $B\text{-}dot_1$ - $B\text{-}dot_3$ набор из трех индуктивных петель.

Для регистрации той части тока дуги, которая может быть захвачена движущейся плазмой и протекающая вдоль оси плазменной струи на диаметре 7.7 см были расположены три индуктивные петли. Индуктивные петли имели два витка диаметром 3.2 мм. Петли располагались в линию по вертикали на расстоянии 4, 10 и 18 мм от плоскости расположения катода дуги. Индуктивные петли располагались внутри изолятора, заливались эпоксидной смолой и не имели контактов с камерой и окружающими их электродами. Индуктивные петли ($B\text{-}dots$) калибровались в режиме короткого замыкания, когда плазменная пушка заменялась стальным стержнем диаметром 10 мм.

2.2. Схема №2

Схема второй модификации узла нагрузки представлена на рис. 9.

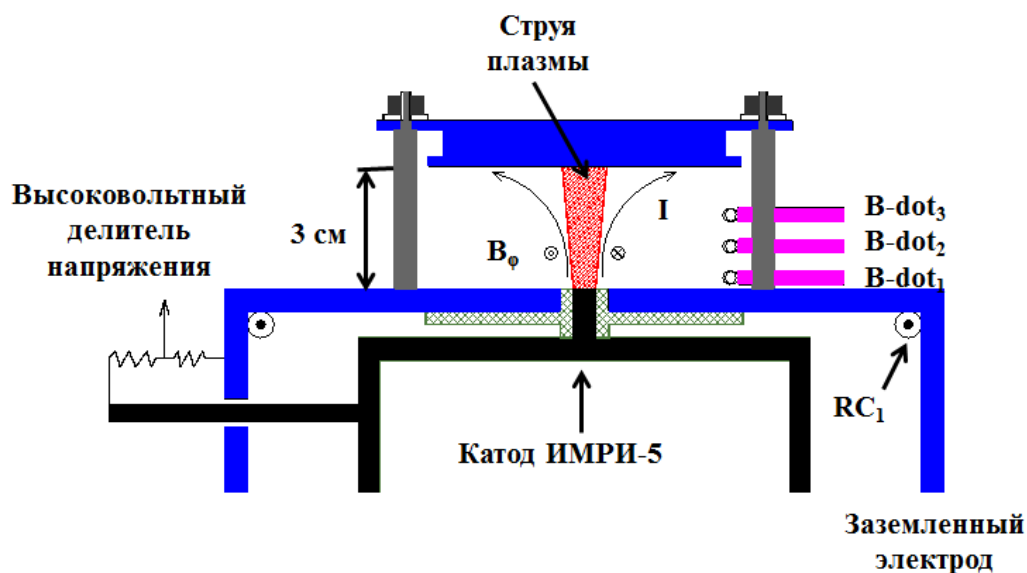


Рис. 9. Схема узла нагрузки сильноточного генератора ИМРИ-5 №2.
RC1 - пояс Роговского, B-dot₁-B-dot₃ - набор из трех индуктивных петель.

Вторая модификация экспериментальной схемы отличалась от первой только наличием обратного токопровода вокруг плазменной струи (см. рис. 9). Обратный токопровод был выполнен в виде четырех стальных стержней диаметром 1 см расположенных на диаметре 6 см. Торцевая часть токопровода была выполнена в виде плоского стального фланца с полостью для расположения пояса Роговского. Расстояние между плазменной пушкой и верхней пластиной составляло 3 см. Индуктивные петли располагались посередине сектора между стержнями обратного токопровода.

2.3. Схема №3

Схема третьей модификации узла нагрузки представлена на рис. 10.

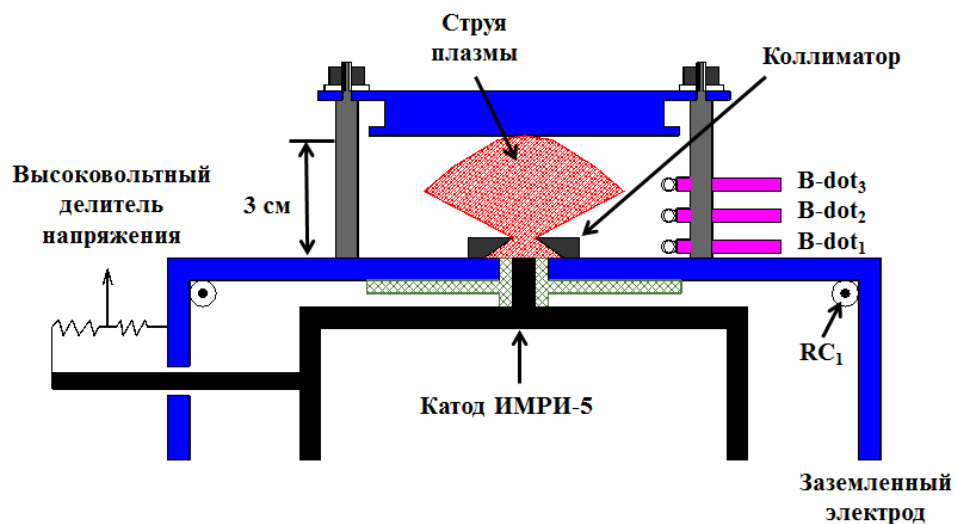


Рис. 10. Схема узла нагрузки сильноточного генератора ИМРИ-5 №3.
RC₁, пояс Роговского, B-dot₁-B-dot₃ набор из трех индуктивных петель.

Третья модификация экспериментальной схемы отличалась от второй только тем, что плазменная пушка располагалась за молибденовым коллиматором, как показано на рис. 10.

2.4. Схема №4

Схема четвертой модификации узла нагрузки представлена на рис. 11.

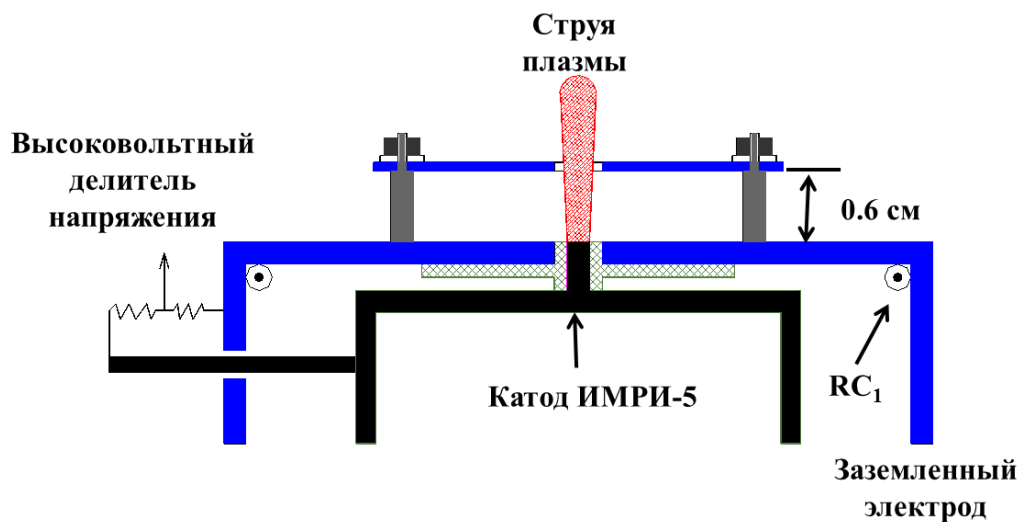


Рис. 11. Схема узла нагрузки сильноточного генератора ИМРИ-5 №4.

RC1, пояс Роговского.

Четвертая модификация экспериментальной схемы (см. рис. 11) отличалась от второй только тем, что стальной фланец обратного токопровода был заменен на дюралюминиевую пластину толщиной 2 мм, по центру которой было просверлено отверстие диаметром 8 мм. Кроме того, высота обратного токопровода была уменьшена до 6 мм. Данная модификация была использована для того, чтобы исследовать структуру плазменного потока, прошедшего через коллиматор.

Глава 3. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.

3.1. Результаты, полученные при использовании экспериментальной схемы №1.

Из литературы [20] известно, что поток плазмы, формируемый плазменной пушкой с током 300 А и длительности 600 мкс, при отсутствии внешнего магнитного поля, имеет довольно широкое распределение. Для того, чтобы проверить, сохраняется ли данная структура разлета вещества и при токах дуги 350 кА при времени нарастания тока 500 нс, были проведены эксперименты, в которых структура плазменного потока, создаваемая плазменной пушкой по геометрии схожей с [19], [20] (см. рис. 8) исследовалась с помощью рентгеновского радиографа на основе генератора XPG с нагрузкой в виде Х-пинча. Кроме того, были проведены измерения тока, который может протекать вдоль оси плазменной струи за счет вмораживания части тока дуги в движущуюся плазму и за счет эмиссионной способности данной плазмы.

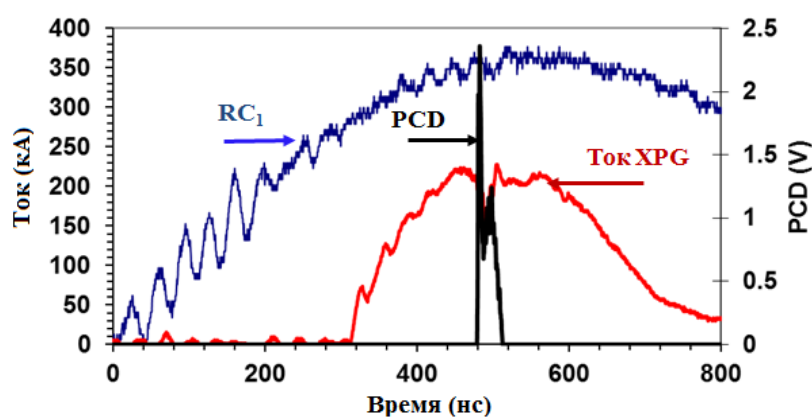


Рис. 12. Осциллограммы токов RC_1 , XPG и сигнала PCD.

Типичные осциллограммы тока генераторов XPG и ИМРИ-5 совместно с сигналом с PCD (Shot 23) приведены на рис. 12.

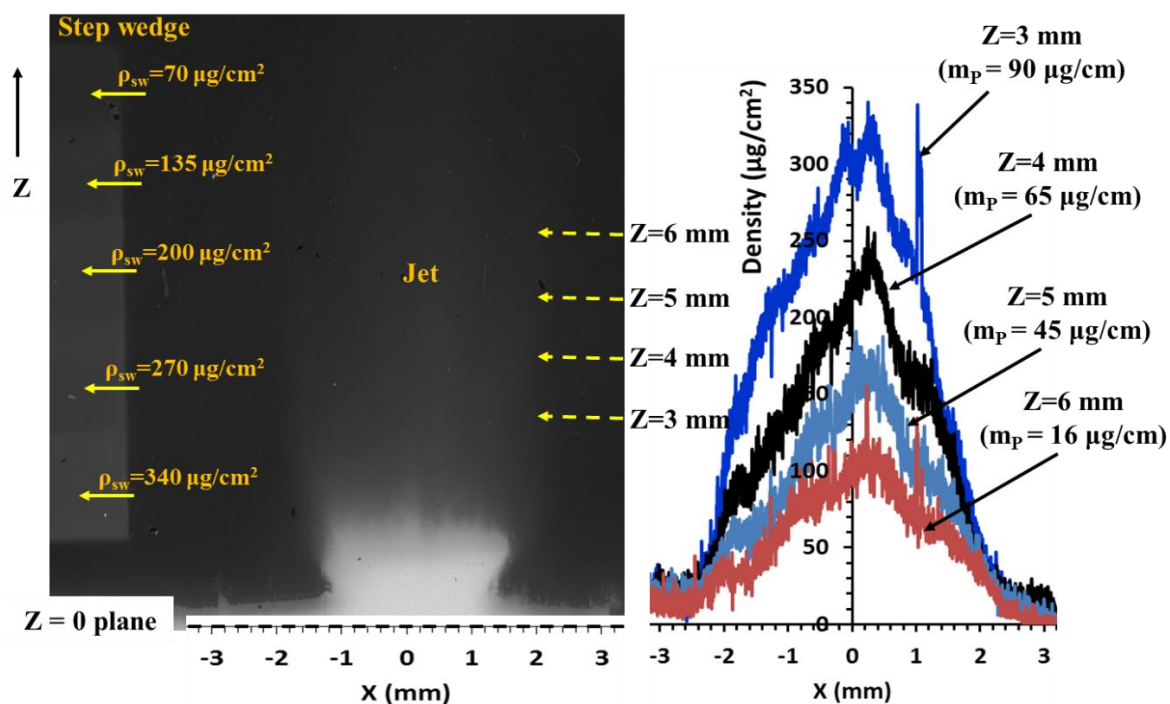


Рис. 13. Рентгеновская теньевая фотография плазменной струи, полученная на 545 нс после начала протекания тока ИМРИ-5.

На рис. 13 приведена рентгеновская теньевая фотография плазменной струи в конфигурации 1, полученная на 545 нс после начала протекания тока ИМРИ-5. На этом же рисунке приведены кривые прописи плотности почернения пленки в различных сечениях, пересчитанные в единицы поверхностной плотности вещества плазмы.

В скобочках приведен интеграл поверхностной плотности вещества, соответствующий погонной массе вещества плазмы в плоскостях, обозначенных $Z = 3 - 6$ мм. Буква Z обозначает расстояние от катода до плоскостей записи вдоль оси плазменной струи. Расстояние между плоскостями прописи составляет 1 мм. Этот диапазон значений Z выбирался из доверительного интервала значений плотности клиновидного слоя, составляющего 20-340 $\text{мкг} / \text{см}^2$.

Испарение вещества происходит равномерно со всей площади катода. Наиболее плотная часть плазмы с линейной массой, превышающей 90 мкг/см, находится на расстоянии 3 мм от поверхности катода.

Однако, из рис. 13 видно, что, струя плазмы хоть и имеет значительную расходимость, но она существенна уже по сравнению с распределением плазменного потока в работе [20]. Данный факт указывает на существование тока вдоль оси плазменной струи, магнитное поле которого способно ограничивать разлет плазмы.

Действительно, анализируя сигналы, полученные с индуктивных петель, видно, что вдоль оси плазменной струи протекает заметный ток (см. рис. 14), который вполне может повлиять на структуру плазменного потока и распределение вещества в нем.

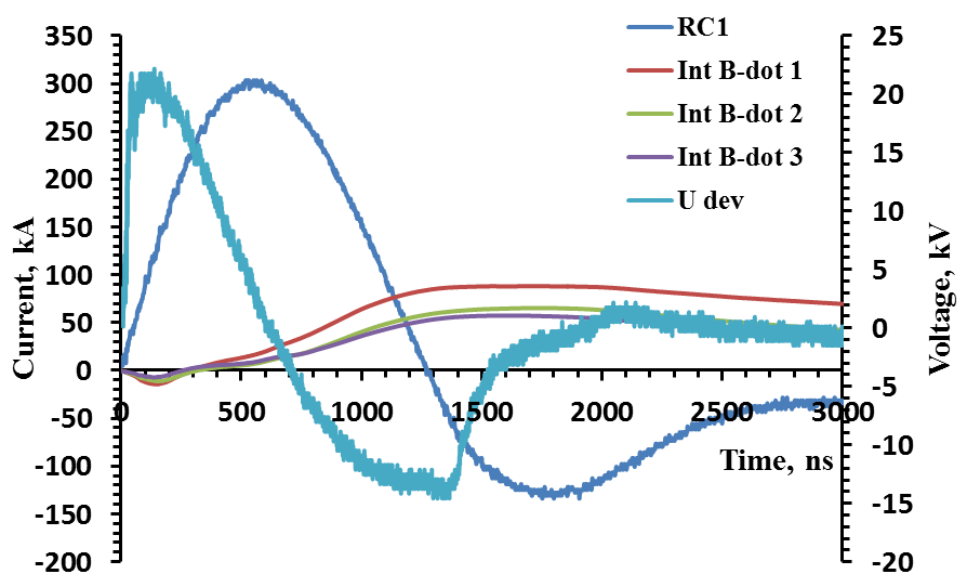


Рис. 14. Осциллограммы тока дуги RC_1 , ток, протекающий вдоль оси плазменной струи рассчитанный по сигналам с индуктивных петель $B\text{-dot}_1$ - $B\text{-dot}_3$, а также сигнал с высоковольтного делителя HV. Диаметр катода дуги равен 3 мм.

3.2. Результаты, полученные при использовании экспериментальной схемы №2.

Поскольку скорость роста тока дугового разряда, в нашем случае, имеет значительную величину (~ 0.7 кА/нс), то при наличии обратного токопровода вокруг плазменной струи следует ожидать захват еще большей части тока дугового разряда движущейся плазмой, что в свою очередь может существенным образом повлиять на структуру формирующегося плазменного потока. Для проверки данного предположения, были проведены эксперименты, в которых плазменная пушка была окружена стержневым обратным токопроводом со сплошной стальной пластиной на верхнем торце токопровода (схема 2).

Изображения плазменной струи в его собственном свечении, зарегистрированные с помощью 4-кадровой оптической камерой HSCF-Pro для схемы 2, показаны на слайде. Катод дуги представляет собой алюминиевый стержень диаметром 5 мм. Как видно на слайде, видимое изображение плазменной струи представляет собой столб диаметром 4 мм и высотой 3 см. Из слайда хорошо видно, что плазменная струя не расширяется, а, наоборот сжимается по мере распространения вдоль оси системы.

Для исследования распределения вещества в узконаправленном плазменном потоке был использован рентгеновский радиограф. В экспериментах с радиографом был использован алюминиевый катод диаметром 3 мм. На слайде приведена рентгеновская теневая фотография такой плазменной струи, полученная на 498 нс после начала протекания тока ИМРИ-5.

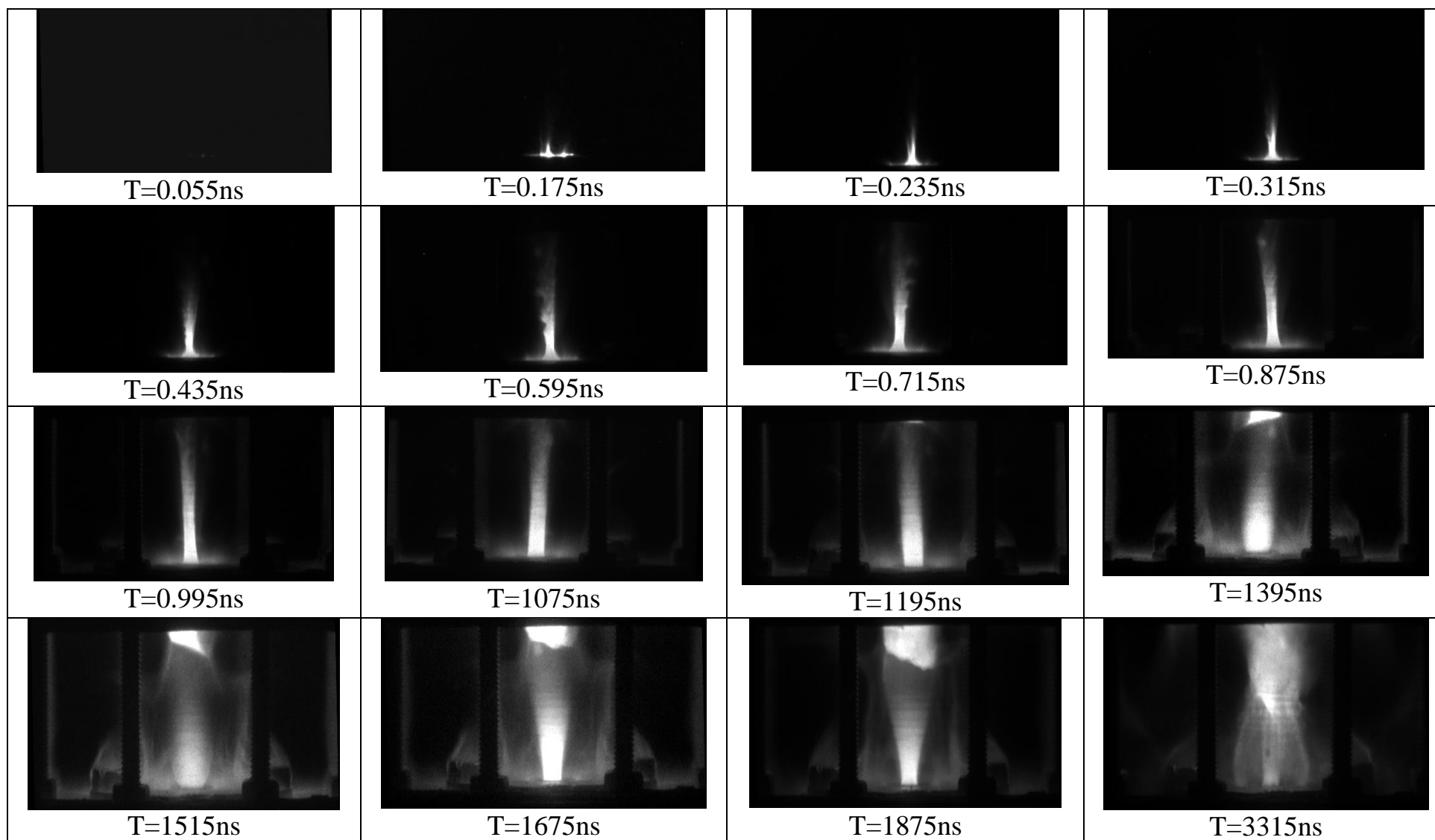


Рис. 15. Изображения струи Al плазмы, зарегистрированные 4-кадровой оптической камерой HSCF-Pro (схема 2).

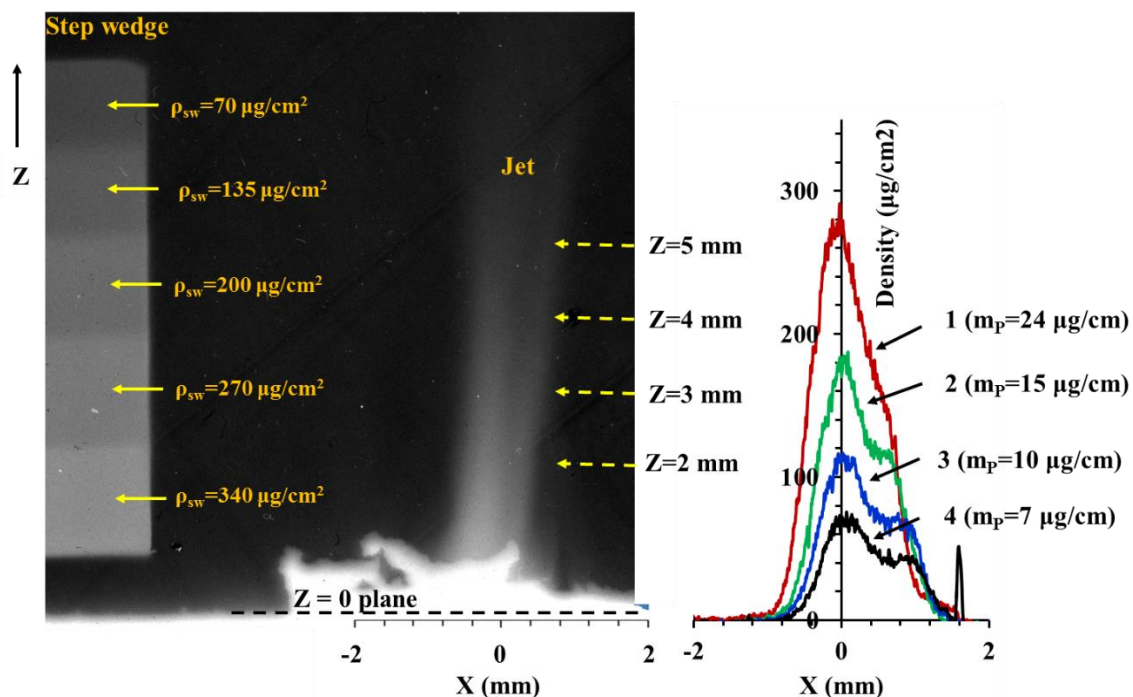


Рис. 16. Рентгеновская теневая фотография плазменной струи, полученная на 498 нс после начала протекания тока ИМРИ-5.

Рентгеновская радиография плазменной струи показывает, что в экспериментах, с обратным токопроводом вокруг плазменной струи, наблюдается формирование узконаправленного потока плазмы. Необходимо заметить, что уменьшение диаметра плазменной струи происходит уже на этапе формирования катодных пятен на поверхности катода, поскольку наблюдается (см. рис.15) начальный диаметр плазменного столба с диаметром 1.9 мм при диаметре катода 3 мм.

Существование такой плазменной структуры возможно только в том случае, если значительная часть тока дуги протекает вдоль плазменной струи. Часть тока дуги уносится движущейся плазмой, которая удерживает плазму от расширения из-за давления собственного магнитного поля. На рис. 17 показаны типичные для схемы 2 осциллограммы тока дуги RC_1 , ток, протекающий вдоль оси плазменной струи рассчитанный по сигналам с индуктивных петель $B\text{-}\dot{1}$ - $B\text{-}\dot{3}$, а также сигнал с высоковольтного делителя HV. Диаметр катода дуги равен 3 мм. (Shot # 51).

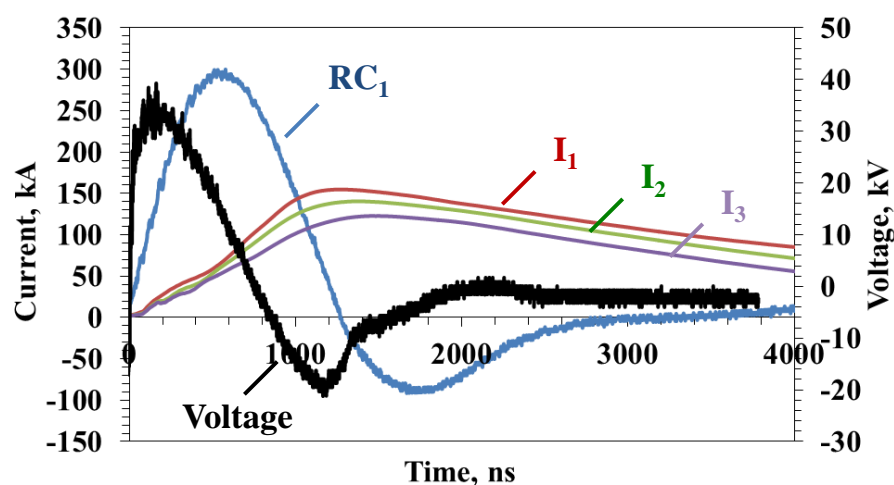


Рис. 17. Осциллограммы тока дуги RC_1 , ток, протекающий вдоль оси плазменной струи рассчитанный по сигналам с индуктивных петель $B\text{-dot}_1$ - $B\text{-dot}_3$, а также сигнал с высоковольтного делителя HV. Диаметр катода дуги равен 3 мм.

Как видно из рис. 17, сигналы с индуктивных петель начинаются синхронно с током RC_1 , что указывает на то, что ток вдоль оси системы начинает протекать с самого начала появления плазмы. Отсутствие задержки между током RC_1 и сигналами с индуктивных петель указывает на то, что фронт тока вдоль оси плазменного столба обусловлен не ускорением радиально распространяющейся плазмы под воздействием электромагнитных сил протекающего тока, а определяется эмиссионными способностями самой плазмы. Необходимо также заметить, что полярность сигналов с индуктивных петель в режиме короткого замыкания и в выстрелах с плазменной пушкой совпадают на всем временном промежутке, что также говорит об отсутствии динамического движения фронта тока в области расположения индуктивных петель. Изображения плазменной струи в различные моменты времени, приведенные на рис. 15, также указывают на то, что формирование узконаправленной плазменной струи происходит с самого начала протекания тока через дугу.

На основе фотографий на рис. 15, можно заключить, что плазменный столб даже в момент времени 1195 нс от начала протекания тока сохраняет свою структуру, несмотря на то, что ток RC_1 в основной цепи близок к нулю. Это подтверждает наличие значительного тока, протекающего через плазму в осевом направлении.

Из осциллограмм на рис. 17 видно, что ток, протекающий через плазменный столб и достигающий верхнего фланца (I_1 - I_3), имеет большую продолжительность по сравнению с током RC_1 , а по амплитуде может составлять около половины основного тока. Данный факт, по-видимому, связан с эмиссией электронов из Al плазмы. Временная задержка между максимальными значениями токов RC_1 и I_1 - I_3 , составляющая около 1.5 мкс, обусловлена движением ионов и указывает, что плазма проходит расстояние 3 см от плазменной пушки до верхнего фланца при средней массовой скорости около 2 см/мкс.

3.3. Результаты, полученные при использовании экспериментальной схемы №3.

Для того, чтобы убедиться, что ток, вызывающий пинч-эффект, отвечает за формирование стержнеобразной структуры плазменной струи, был проведен дополнительный эксперимент. В экспериментах плазменная пушка располагалась за коллиматором, как показано на рис. 10 (схема 3). Катодом дуги является алюминиевый стержень диаметром 5 мм, расположенный внутри коллиматора с отверстием диаметром 5 мм. В данной конфигурации захват тока дуги истекающей плазмой затруднен, поскольку весь ток замыкается на поверхность коллиматора, расположенного вокруг катода плазменной пушки.

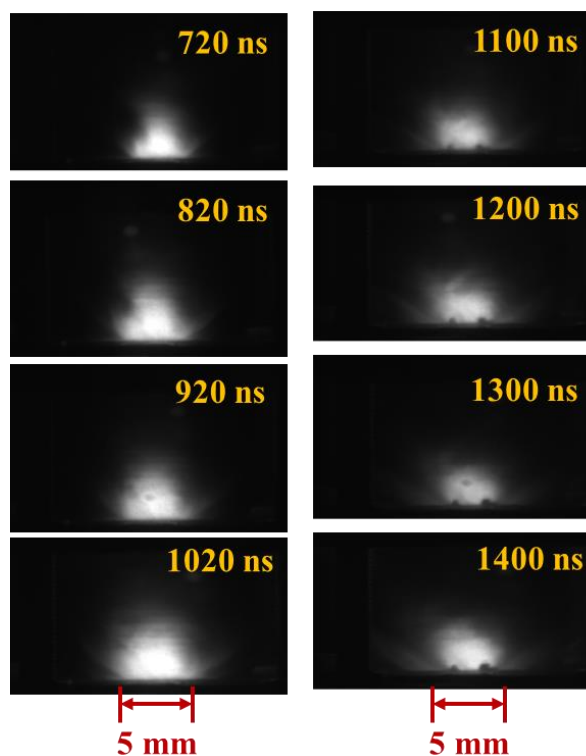


Рис. 18. Изображения Al плазменной струи в видимом свете, зарегистрированные 4-кадровой оптической камерой HSCF-Pro.

Изображения Al плазменной струи в его собственном свечении, зарегистрированные при помощи 4-кадровой оптической камеры HSCF-Pro, показаны на рис. 18.

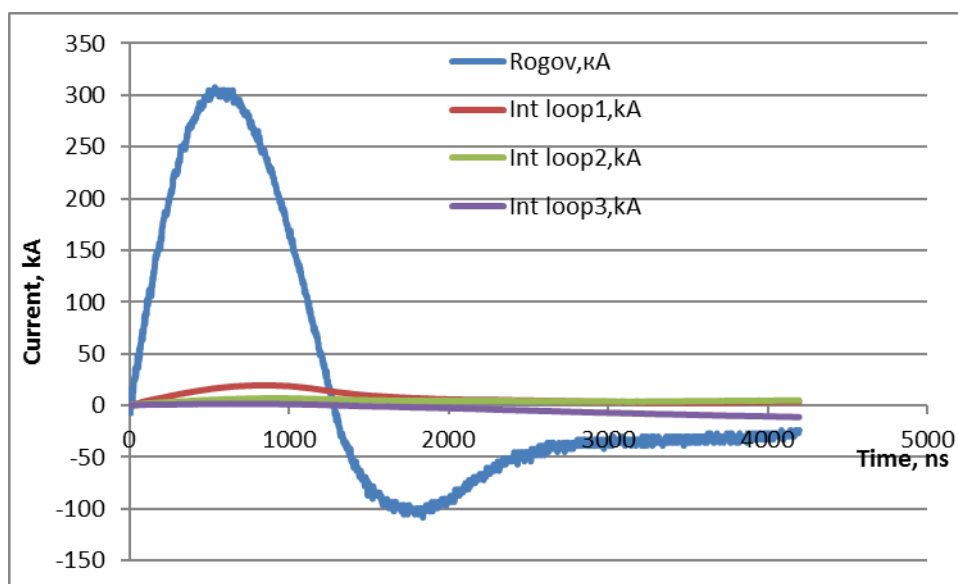


Рис. 19. Осциллограммы тока дуги RC1, а также сигналы индуктивных петель.

Как видно из рис. 18, расположение плазменной пушки за коллиматором полностью разрушило структуру плазменной струи. Видно, что плазма вытекает из коллиматора в виде широкого плазменного потока с большим углом разлета. Электрические измерения, приведенные на рис. 19, показывают полное исчезновение тока вдоль оси распространения плазмы. Это означает, что наличие коллиматора полностью подавляет ток, вызывающий пинч-эффект.

3.4. Результаты, полученные при использовании экспериментальной схемы №4.

Существование схемы инъекции потока плазмы, в которой за счет пинч-эффекта формируется узконаправленный пучок квазинейтральной плазмы, является привлекательным с точки зрения формирования направленных потоков вещества. Так, например, такой плазменный пучок может быть использован для инъекции вещества при формировании Z-пинчей. Однако, для этого необходимо убедиться, что плазменная струя сохраняет свою направленность при прохождении сквозь выводящий коллиматор, который можно разместить в обратном токопроводе по оси системы.

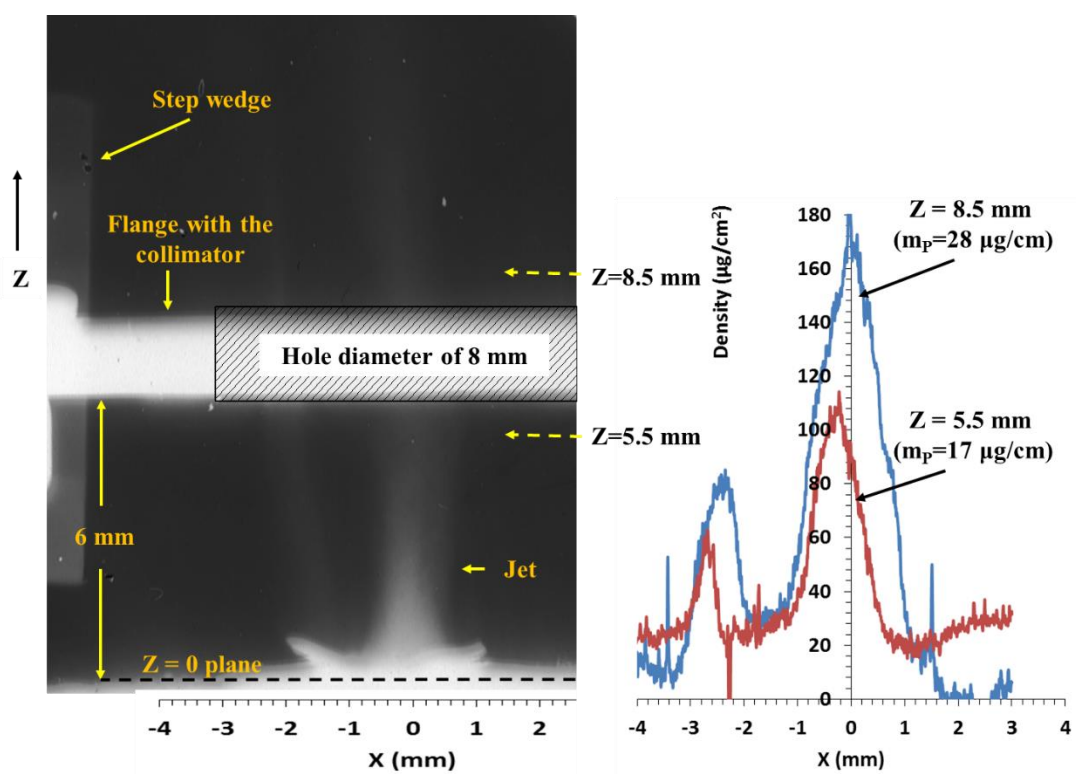


Рис. 20. Радиографическое изображение плазменной струи, полученное на 535 нс после начала протекания тока ИМРИ-5.

На рис. 11 показана схема формирования узконаправленного плазменного потока с выходным коллиматором диаметром 8 мм расположенного по оси пучка на расстоянии 6 мм от плазменной пушки (схема 4). На рис. 20 приведено радиографическое изображение плазменной струи, полученное на 535 нс после начала протекания тока ИМРИ-5 в геометрии 4.

Из рис. 20 видно, что струя плазмы беспрепятственно проходит через отверстие в верхнем фланце обратного токопровода сохраняя свою узконаправленную структуру. Данный факт позволяет утверждать, что таким образом можно формировать пучок квазинейтральной плазмы имеющий малую расходимость.

3.5 Определение средней массовой скорости плазменной струи.

На рис. 21 в графическом виде (треугольниками) представлены значения линейной плотности плазменной струи на различном расстоянии от поверхности катода, которые были полученные при использовании схемы 1 и ранее показанные на рис.13. На этом же рисунке приведена линейная интерполяция полученных значений линейной массы плазменной струи. Точка пересечения интерполяционной прямой с осью Z , указывает на координату расположения условного фронта движущегося вещества с линейной массой равной $2 - 5 \text{ } \mu\text{g/cm}$. Зная координату и время регистрации можно оценить и скорость движения условного фронта вещества с указанной выше линейной массой. Такая оценка показывает, что скорость движения плазмы составляет около 1.4 см/мкс , что хорошо согласуется с измерениями, сделанными в работе [19].

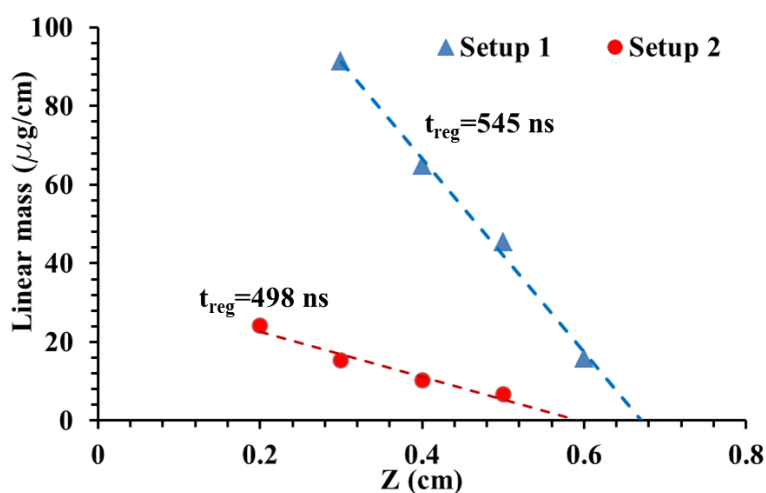


Рис. 21. Значения линейной массы плазменной струи на различных расстояниях от катода определенные для схемы 1 (взятых на 535-й нс после включения тока ИМРИ-5) и для схемы 2 (взятых на 498-й нс после включения тока ИМРИ-5).

На этом же рисунке (рис. 21) в графическом виде (красные окружности) представлены значения линейной плотности плазменной струи на различном расстоянии от поверхности катода, которые были полученные

при использовании схемы 2, (радиографическое изображение которой было ранее показано на рис. 16) совместно с их линейной интерполяцией. Оценки показывают, что скорость движения плазмы в данном случае, также, как и в случае схемы 1, составляет около 1.4 см/мкс. Исходя из факта, что для двух разных схем формирования плазменной струи были получены очень близкие значения скорости движения условной границы плазмы, можно заключить, что скорость распространения плазмы не зависит от способа её формирования.

Глава 4. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПИНЧЕВАНИЯ ПЛАЗМЕННОГО СТОЛБА.

4.1. Критерий пинчевания в условиях характерных для плазмы дугового разряда.

Поскольку имеется плазменный столб со слабо меняющимся диаметром, распространение вещества происходит в условиях, близких к беннетовскому равновесию, т. е. при приблизительном равенстве магнитного давления снаружи и теплового давления изнутри плазменного столба. Давление плазмы можно выразить как:

$$p = N_i \cdot (1 + \bar{Z}) \cdot k \cdot T, \quad (15)$$

где N_i — концентрация ионов в плазменной струе, Z — средний заряд ионов, T — температура плазмы, k — постоянная Больцмана.

В работе [22] показано, что при любой зависимости распределения плотности тока внутри пинча условие беннетовского равновесия в системе СГС имеет вид:

$$k \cdot T = \frac{I^2}{2 \cdot c \cdot N_i \cdot (1 + \bar{Z})}, \quad (16)$$

где I — ток через пинч, N_i — число ионов на единицу длины пинча, c — скорость света в вакууме.

В работе [19] показано, что типичный средний заряд ионов алюминия в электродуговом разряде равен 1.7, а электронная температура около 3 эВ. Исходя из рис.16, масса вещества плазмы на единицу длины в нашем случае изменяется по длине столба в пределах 10 – 70 мкг/см, что соответствует $N_i = (0.2 - 1.5) \cdot 10^{18}$ ионов алюминия на сантиметр длины. Тогда ток необходимый для существования беннетовского равновесия составит $I = 22 - 62$ кА, что достаточно хорошо согласовывается с величиной тока регистрируемого с помощью пояса Роговского RC₂.

Глава 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭРОЗИИ АЛЮМИНИЕВОГО КАТОДА ВАКУУМНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА НА ОСНОВЕ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Одним из многочисленных применений вакуумного дугового разряда является использование испаренного материала катода в качестве рабочего вещества для Z и PZ -пинчей. Одним из основных параметров лайнеров является масса вещества, участвующая в сжатии пинча. Традиционным методом оценки массы лайнера является ноль-мерный расчет, основанный на знании протекающего тока и момента сжатия пинча. Однако основным фактором неопределенности таких оценок является незнание начального диаметра, сжимающегося Z -пинча. В связи с этим, нами была предпринята попытка определения массы распространяющейся плазменной струи дугового разряда прямым методом, основанным на использовании импульсной рентгеновской радиографии.

В третьей главе был подробно описан способ обработки радиографических изображений плазменной струи и методы оценки линейной массы плазменного потока на различных расстояниях от поверхности катода. По вышеописанной методике были обработаны все результативные выстрелы для алюминиевых катодов диаметром 3 и 7 мм.

Поскольку все радиографические изображения были получены в различные моменты времени, можно провести анализ эрозионных характеристик алюминиевого катода в различные моменты времени и при протекании различного тока дуги. Анализ производился следующим образом. Поскольку из радиографических изображений плазменного потока можно определить линейную массу вещества на различном расстоянии от поверхности катода, то интегрируя по длине плазменного столба можно получить оценку полной массы плазмы. На рис.22 приведен пример такого интегрирования для выстрела, в котором радиографическое изображение струи было получено на 850 нс после начала протекания тока.

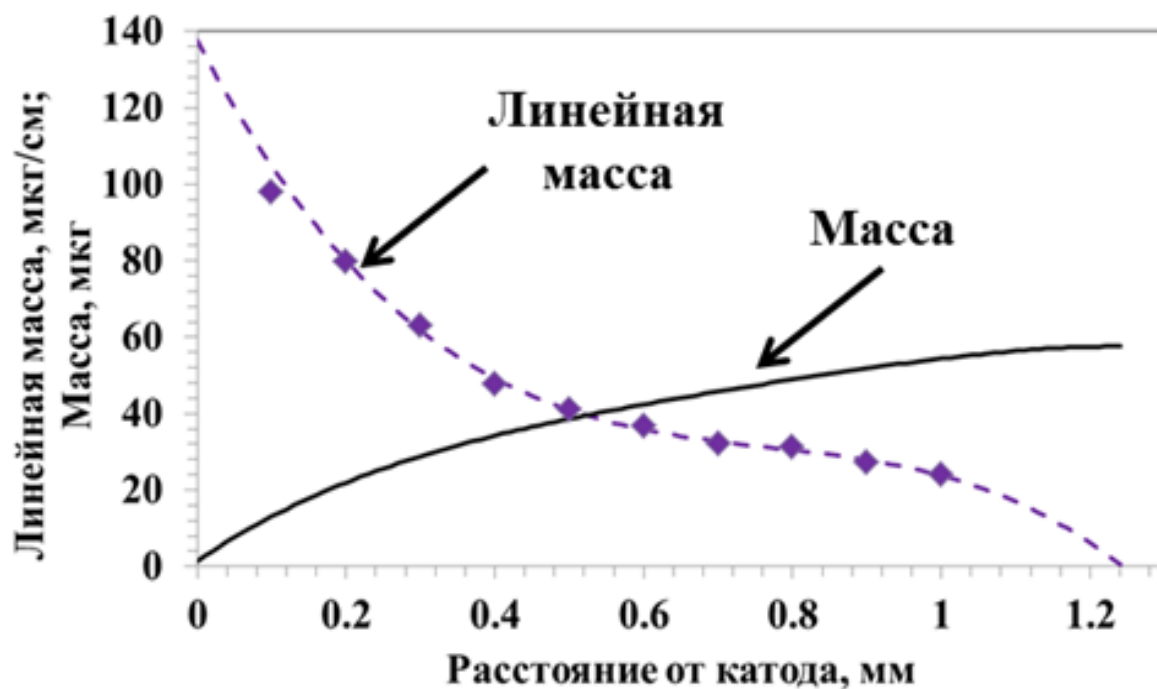


Рис. 22. Распределение линейной массы вдоль оси плазменной струи и её суммарная масса, полученные на $t_{\text{рег}} = 850$ нс после начала протекания тока ИМРИ-5.

Для того, чтобы проинтегрировать (найти площадь) под дискретными значениями линейной массы, сначала данные дискретные значения были описаны полиномом третьего порядка. Найденная функциональная зависимость интегрировалась от нуля (поверхность катода) до расстояния, где полином пересекал ось X (см. рис.22) и таким образом, была определена общая масса плазмы.

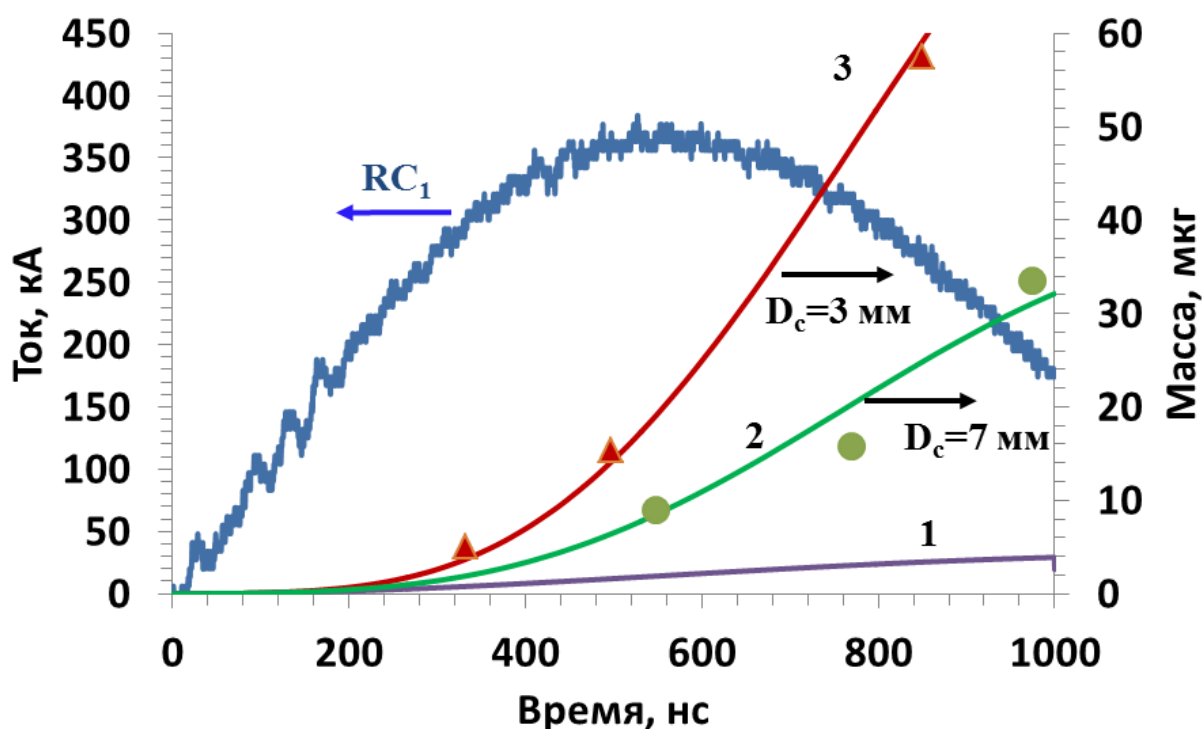


Рис.23. Ток дуги и значения общей массы плазменной струи в различные моменты времени для алюминиевых катодов диаметром $D_c = 3$ и 7 мм. Кривые 2 и 3 получены по формуле (17) при значениях коэффициента ионной эрозии катода γ рассчитанной в соответствии с формулой (18).

Полученные таким образом массы плазменной струи для различных моментов времени и для различных диаметров катода (совместно с осциллограммой тока дуги) показаны на рис.23. Кривая 1 (см.рис.23) соответствует массе испаренного вещества катода рассчитанная по формуле (17), где величина ионной эрозии $\gamma = \gamma_0 = 15$ мкг/Кл [21].

$$M_{pl} = \gamma \cdot \int_0^t I(t) \cdot dt, \quad (17)$$

Как можно видеть из рис.23, если предположить, что испарение вещества дуги происходит в соответствии с табличным значением коэффициента ионной эрозии $\gamma = 15$ мкг/Кл, то видно явное несоответствие рассчитанной и реально обнаруженной массой испаренного вещества катода. Для того чтобы получить соответствие рассчитанной и экспериментально

полученной массы плазменной струи необходимо допустить, что коэффициент ионной эрозии γ растет с увеличением плотности заряда, протёкшего через испаряемый катод. Хорошее соответствие эксперимента и расчета (кривые 2 и 3 на рис.23) достигается при значениях γ :

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \left(1 + k \cdot \frac{Q}{S}\right), \quad (18)$$

где $k = 571$ - это подборочный коэффициент; Q (Кл) - заряд, протекший на момент регистрации; S (мм²) - площадь катода.

Как можно видеть из рис. 23, предположение, что коэффициент ионной эрозии γ растет с увеличением плотности заряда и хорошо описывает полученные экспериментальные результаты для двух различных диаметров катода. Данный факт указывает на универсальность такого подхода и значительно облегчает способ расчета массы испаренного вещества с поверхности катода вакуумного дугового разряда.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студент:

| | | | |
|--|--------------|---|---|
| Группа | | ФИО | |
| 4НМ61 | | Дятлов Александр Викторович | |
| Институт | ИШНПТ | Кафедра | ВЭСЭ |
| Уровень образования | Магистратура | Направление/специальность | Высоковольтная электрофизика и сильноточная электроника |
| Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»: | | | |
| 1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих | | Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах | |
| 2. Нормы и нормативы расходования ресурсов | | | |
| 3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования | | | |
| Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке: | | | |
| 1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения | | Описание потенциального потребителя, карта сегментирования, SWOT анализ | |
| 2. Планирование этапов и выполнения работ по НИР (определение состава работы, определение действующих лиц, установление длительности и трудоемкости работы) | | Планирование научно-исследовательских работ, определение действующих лиц, длительности и трудоемкости работ. | |
| 2. Планирование и формирование бюджета научных исследований | | Составление иерархической и организационной структуры НИ; представление плана НИ; формирование бюджета затрат НИ. | |
| Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): | | | |
| 1. Оценочная карта конкурентных технических решений 2. Матрица SWOT 3. Иерархическая структура работ 4. Календарный план проекта 5. Бюджет проекта | | | |
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику | | | |

Задание выдал консультант:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|--------------------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент | Старикова Екатерина Васильевна | к.филос.н | | |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|-------------|---------|------|
| 4НМ61 | Дятлов А.В. | | |

Глава 6. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов.

Темой научно-технического исследования является исследование физических процессов формирования интенсивных потоков плазмы на основе сильноточного вакуумного дугового разряда применительно к Z-пинчам. Проведение исследования заключается в создании новых технологий формирования плазменной оболочки Z-пинча и совершенствовании уже достигнутых преимуществ использования вакуумных дуговых разрядов при формировании лайнерных структур необходимой конфигурации и имеющих изначально высокую проводимость.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-технического исследования, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

- оценить коммерческий потенциал и перспективность проведения научного исследования;

- осуществить планирование этапов выполнения исследования;
- произвести оценку социальной и экономической эффективности

исследования.

6.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

6.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

В ходе выполнения работы были созданы новые технологий формирования плазменной оболочки Z-пинча и усовершенствованы уже достигнутые преимущества использования вакуумных дуговых разрядов при формировании лайнерных структур необходимой конфигурации и имеющих изначально высокую проводимость. Похожие диагностики широко используются более 10 лет в различных лабораториях мира, для производства высококачественных рентгеновских изображений плазменных струй с превосходными пространственными и временными разрешениями. Появление возможности использования столь мощного исследовательского инструмента позволит получить новые данные о плазменных объектах, диагностика которых другими методами затруднительна.

Исследование в силу своей специфики будет иметь своим целевым рынком следующие предприятия:

- ИСЭ СО РАН
- НИИ ТПУ
- АО «НПФ «Микран»
- ПАО «Машиностроительный завод»
- ИФП СО РАН

Таблица 1 – Карта сегментирования рынка услуг по использованию
результатов исследований

| | | Применение | | |
|-------------|---------|-----------------|----------------|---------------------------------------|
| | | Приборостроение | Машиностроение | Предприятия медицинской отрасли |
| Потребность | Сильная | | | |
| | Слабая | | | |

Выводы: Основными сегментами исследования являются области приборостроения и машиностроения, на которые и ориентируется предприятие. Разрабатываемая технология будет востребована в научных институтах и предприятиях деятельность которых направлена на изучение плазменных структур.

6.2. SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Составление итоговой матрицы SWOT-анализа:

Таблица 2 - Итоговая матрица SWOT-анализа

| | | |
|--|---|--|
| | <p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Экологичность технологии.</p> <p>С2. Принципиально новая конструкция</p> <p>С3. Наличие бюджетного финансирования.</p> <p>С4. Квалифицированный персонал</p> <p>С5. Качественные материалы</p> <p>С6. Применение современных программно-технических комплексов</p> <p>С7. Наличие опытного научного руководителя</p> <p>С8. Актуальность проводимого исследования</p> | <p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Отсутствие прототипа научной разработки</p> <p>Сл2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой</p> <p>Сл3. “Старение кадров”, уход квалифицированных специалистов в другие сферы и предприятия.</p> <p>Сл4. Ограниченность исходных данных</p> <p>Сл5. Старение материально-технической базы</p> |
| <p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В2. Использование инфраструктуры ИСЭ СО РАН</p> <p>В3. Реализация программы дополнительного финансирования из бюджетных и внебюджетных источников</p> <p>В4. Повышение стоимости</p> | <p>Поддержка со стороны СО РАН очень сильно скажется на продвижении исследования и ускорит темпы результатов исследования.</p> | <p>Помощь СО РАН может выражаться в уменьшении стоимости пользования установкой до той величины, которую сможет финансировать государственный бюджет для данного исследования</p> |

| | | |
|---|--|---|
| <p>конкурентных разработок</p> <p>В5. Возможность создания партнерских отношений с другими научными учреждениями</p> <p>В6. Большой потенциал применения метода математического моделирования</p> | | |
| <p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства</p> <p>У2. Развитая конкуренция технологий производства.</p> <p>У3. Ограничения на экспорт технологии</p> <p>У4. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства</p> <p>У5. Малый рынок сбыта</p> | <p>Государство заинтересовано в развитии науки и в последние годы стало всё больше средств вкладывать в финансирование научной деятельности. Чем быстрее результаты исследования будут внедрены в производство, тем быстрее исчезнут факторы, угрожающие развитию исследования. В дальнейшем возможна заинтересованность производственной стороны в финансировании проекта и его развития.</p> | <p>На данный момент слабые стороны связаны с выходом из строя дорогостоящих элементов оборудования, нехваткой финансов для проведения исследования.</p> |

По результатам SWOT-анализа можно сделать вывод о том, что проведение дальнейших исследований и открытие новых перспектив, по усовершенствованию установки и сотрудничеству с научными исследовательскими центрами могут способствовать выше перечисленным сильным сторонам НИП.

Основными рекомендациями по направлению развития исследования являются:

- Усовершенствование взаимодействия между различными подразделениями предприятия, четкое распределение ответственности и полномочий на каждый вид деятельности, оценивание понимания сотрудников своих задач и заинтересованности в общем результате работы;
- Стимулирование развития работ по улучшению качества, систематическое совершенствование методов и средств обеспечения и контроля качества, стимулирование научно-практической деятельности;
- Оптимизация организационно – производственного процесса, повышение производительности труда, сокращение себестоимости продукции - уменьшения затрат на этапах производства изделий.

6.3. Планирование этапов и выполнения работ проводимого научного исследования

6.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

В данном разделе составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования и произведено распределение исполнителей по видам работ. Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 3.

| Основные этапы | № раб | Содержание исследовательской части работ | Содержание технической части работ | Должность исполнителя |
|--------------------------------|--------------|---|---|------------------------------|
| Разработка тех. задания | 1 | Составление и утверждение технического задания | Получение технического задания и его согласование. | Научный руководитель |
| Выбор направления исследований | 2 | Подбор и изучение материалов по теме | Сбор необходимых данных, технических параметров оборудования, изучения технологического процесса. | Студент |
| | 3 | Выбор направления исследований | Выбор способа проведения технической стороны исследования и его обоснование; составление математических моделей. | Руководитель, студент |
| | 4 | Календарное планирование работ по теме | Составление графика выполнения работ на всех этапах | Руководитель |
| Теоретические исследования | 5 | Проведение теоретических расчетов и обоснований | Проведение теоретических расчетов, а затем необходимых экспериментов для их подтверждения. | Студент |
| Обобщение и оценка результатов | 6 | Оценка эффективности полученных результатов | Анализ результатов проведенного научно-технического исследования, выдача рекомендаций относительно решаемой задачи. | Руководитель, студент |
| Обобщение и оценка результатов | 7 | Составление пояснительной записки | Составление отчета о проделанной работе, с указанием проблематики проводимого исследования, результатов и принятых технических решений. | Студент |
| | 8 | Публикация полученных результатов | Передача результатов исследования заказчику и их внедрение в процесс производства. | Научный руководитель |

Таблица 3 - Перечень этапов работ и распределение исполнителей

6.3.2. Планирование этапов и выполнения работ проводимого научного исследования

6.3.2.1. Структура работ в рамках научного исследования

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (18)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.; $t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.; $t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость данной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (19)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.; $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн. $Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

В таблице 4 приведены ожидаемая трудоемкость и время выполнения работ.

6.3.2.2. Разработка графика проведения научного исследования

Наиболее удобным и наглядным в данном случае является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта. Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} * k_{\text{кал}}, \quad (20)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = \frac{365}{247} = 1.48, \quad (21)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году (пятидневная рабочая неделя);

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа. Все рассчитанные значения сведены в таблицу 4.

| Название работы | Трудоёмкость работ | | | | | | Исполни- тели | | Длительность работ в рабочих днях T _{pi} | | Длительность работ в календарных днях T _{ki} | |
|--|-----------------------------------|---------|-----------------------------------|---------|--------------------------------|---------|------------------|---------|--|---------|--|---------|
| | t _{min} , чел- дни | | t _{max} , чел- дни | | T _{ожі} , чел- дни | | | | | | | |
| | Науч.рук. | Студент | Науч.рук. | Студент | Науч.рук | Студент | Науч.рук. | Студент | Науч.рук | Студент | Науч.рук | Студент |
| Составление и утверждение технического задания | 2 | - | 4 | - | 2,8 | - | 1 | - | 2,8 | - | 4 | - |
| Подбор и изучение материалов по теме | - | 14 | - | 21 | - | 16,8 | - | 1 | - | 16,8 | - | 25 |
| Выбор направления исследований | 2 | 4 | 3 | 5 | 2,4 | 4,4 | 1 | 1 | 2,4 | 4,4 | 4 | 7 |
| Календарное планирование работ по теме | 3 | - | 7 | - | 4,6 | - | 1 | - | 4,6 | - | 7 | - |
| Проведение теоретических расчетов и обоснований | - | 21 | - | 28 | - | 23,8 | - | 1 | - | 23,8 | - | 35 |
| Оценка эффективности полученных результатов | 3 | 7 | 5 | 14 | 3,8 | 9,8 | 1 | 1 | 3,8 | 9,8 | 6 | 15 |
| Составление пояснительной записки | - | 5 | - | 10 | - | 5 | - | 1 | - | 5 | - | 7 |
| Публикация полученных результатов | 2 | - | 4 | - | 2,8 | - | 1 | - | 2,8 | - | 4 | - |

Таблица 4. - Временные показатели проведения научного исследования

Итого длительность работ – 114 календарных дней.

На основе таблицы 4 строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта, с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени написания ВКР. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Календарный план-график построенный для максимального по длительности второго варианта исполнения работ рамках научно-исследовательского проекта приведен в таблице 5:

Вывод: общее число работ составило 8. Ожидаемая трудоемкость работ для научного руководителя составила 16 чел-дней, для студента-исполнителя составила 60 чел-дней. Общая максимальная длительность выполнения работы составила 114 календарных дней.

| № | Вид работ | Исполнители | Т _{кi} , кал. дн | Продолжительность выполнения работ | | | | | | | | | | | |
|---|---|---------------------|---------------------------------|------------------------------------|---|---|------|---|---|--------|---|---|-----|---|---|
| | | | | Февраль | | | Март | | | Апрель | | | Май | | |
| | | | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 1 | Составление и утверждение технического задания | Науч. рук. | 4 | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Подбор и изучение материалов по теме | Студент | 25 | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Выбор направления исследования | Науч. рук., студент | 11 | | | | | | | | | | | | |
| 4 | Календарное планирование работ по теме | Науч. рук. | 7 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | Проведение теоретических расчетов и обоснований | Студент | 35 | | | | | | | | | | | | |
| 6 | Оценка эффективности полученных результатов | Науч. рук., студент | 21 | | | | | | | | | | | | |
| 7 | Составление пояснительной записки | Студент | 7 | | | | | | | | | | | | |
| 8 | Публикация полученных результатов | Науч. рук. | 4 | | | | | | | | | | | | |

Таблица 5 - Календарный план-график проведения НИР (Диаграмма Ганта)



Научный

Руководитель



Студент

6.4. Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета научного исследования используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты научного исследования;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

6.4.1. Расчет материальных затрат научного исследования

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

- приобретаемые со стороны сырье и материалы, необходимые для создания научно-технической продукции;
- покупные материалы, используемые в процессе создания научно-технической продукции для обеспечения нормального технологического процесса;
- покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, подвергающиеся в дальнейшем монтажу или дополнительной обработке;

– сырье и материалы, покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, используемые в качестве объектов исследований.

Некоторые материалы: генератор, масла и реагенты являются собственностью лаборатории ОВПЭ, поэтому в расчет показателей затрат не берутся.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) * \sum_{i=1}^m C_i * N_{расхi}, \quad (22)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования; $N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.); C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.); k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями-изготовителями (либо организациями-поставщиками).

Основные работы для ВКР проводились за установкой в экспериментальной комнате отдела и на ПК. Эксперименты проводились 13 дней по 3 часа (39 часов), мощность установки 10 кВт/час.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C_{эл} = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об}, \quad (23)$$

где $C_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (4 руб. за 1 кВт·ч); P – мощность оборудования, кВт; $F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

$$C_{\text{эл}} = 4 \cdot 10 \cdot 13 = 520 \text{ руб.}$$

Материальные затраты находятся по формуле:

$$C_{\text{м}} = C_{\text{эл}} + C_{\text{вд}} + C_{\text{материал}}, \quad (24)$$

Расчет затрат представлен в таблице 6.

Таблица 6 - Материальные затраты

| Наименование | Единица измерения | Количество | Цена за ед., руб. | Затраты на материалы (З _м), руб. |
|-------------------|-------------------|------------|-------------------|--|
| Электроэнергия | кВт/ч | 130 | 4 | 520 |
| Бумага формата А4 | Упаковка | 1 | 200 | 200 |
| Картридж | Штука | 1 | 600 | 600 |
| Ручка | Штука | 1 | 30 | 30 |
| Тетрадь | Штука | 1 | 60 | 60 |
| Итого | | | | 1410 |

6.4.2. Основная заработная плата научно-производственного персонала

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20–30 % от тарифа или оклада.

Расчет основной заработной платы сводится в таблице 7.

Таблица 7 - Расчет основной заработной платы

| № п/п | Наименование этапов | Исполнители по категориям | Трудоемкость, чел. дн. | Заработная плата, приходящаяся на один чел. дн., руб. | Всего заработная плата по тарифу (окладам), руб |
|---------------|--|---------------------------------|---------------------------|---|--|
| 1 | Составление и утверждение технического задания | Науч. рук. | 4 | 1294 | 5176 |
| 2 | Подбор и изучение материалов по теме | Студент | 25 | 132 | 3300 |
| 3 | Выбор направления исследования | Науч. рук., студент | 11 | 1294 132 | 14234 1452 |
| 4 | Календарное планирование работ по теме | Науч. рук. | 7 | 1294 | 9058 |
| 5 | Проведение теоретических расчетов и обоснований | Студент | 35 | 132 | 4620 |
| 6 | Оценка эффективности полученных результатов | Науч. рук., студент | 21 | 1294 132 | 27174 2772 |
| 7 | Составление пояснительной записки | Студент | 7 | 132 | 924 |
| 8 | Публикация полученных результатов | Науч. рук. | 4 | 1294 | 5176 |
| Итого: | | | | | 73886 |

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (25)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата; $Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12–20 % от $Z_{\text{осн}}$).

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, студента) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} * T_{\text{раб}} = 1294 * 31 = 40121 \text{ руб.}, \quad (26)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника; $T_{\text{раб}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.; $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} * M}{F_{\text{д}}} = \frac{20000 * 11,2}{225} = 1294 \text{ руб.}, \quad (27)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5–дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6–дневная неделя; $F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 8).

Таблица 8 – Баланс рабочего времени

| Показатели рабочего времени | Руководитель | Студент |
|--|--------------|---------|
| Календарное число дней | 365 | 365 |
| Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни | 109 | 109 |
| Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни | 31 | 41 |
| Действительный годовой фонд рабочего времени | 225 | 215 |

Месячный должностной оклад работника:

$$З_м = З_б * (k_{пр} + k_д) * k_p = 20000 * 1,3 = 26000 \text{ руб.}, \quad (28)$$

где $З_б$ – базовый оклад, руб.; $k_{пр}$ – премиальный коэффициент, (определяется Положением об оплате труда); $k_д$ – коэффициент доплат и надбавок (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: определяется Положением об оплате труда); k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 9.

Таблица 9 - Расчёт основной заработной платы

| Исполнители | $З_{тс}$, руб. | k_p | $З_м$, руб | $З_{дн}$, руб. | T_p , раб. дн | $З_{осн}$, руб. |
|--------------|-----------------|-------|-------------|-----------------|--------------------|------------------|
| Руководитель | 20000 | 1,3 | 26000 | 1294 | 31 | 40121 |
| Студент | 2642 | - | 2642 | 132 | 25 | 3288 |
| Итого | | | | | | 43409 |

6.4.3. Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы). Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10- 15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы:

$$З_{доп} = k_{доп} * З_{осн} = 40121 * 0,12 = 4815 \text{ руб.}, \quad (29)$$

где $З_{доп}$ – дополнительная заработная плата, руб.; $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной зарплаты; $З_{осн}$ – основная заработная плата, руб.

В таблице 10 приведена форма расчёта дополнительной заработной платы.

Таблица 10 – Расчёт дополнительной заработной платы

| Исполнитель | $k_{\text{доп}}$ | $Z_{\text{осн, руб.}}$ | $Z_{\text{доп, руб}}$ |
|--------------|------------------|------------------------|-----------------------|
| Руководитель | 0,12 | 40121 | 4815 |
| Итого | | | 4815 |

6.4.4. Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} * (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,3 * (40121 + 4815) = 13480 \text{ руб.}, \quad (30)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

6.4.5. Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 70 - 90 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации.

Накладные расходы в ТПУ составляют 25–35 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} * (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,4 * (40121 + 4815) = 17363 \text{ руб.}, \quad (31)$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов, равный $30 + 10 = 40 \%$.

Где дополнительные 10% учитывают амортизацию.

6.4.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы “Исследование физических процессов формирования интенсивных потоков плазмы на основе сильноточного вакуумного дугового разряда применительно к Z-пинчам” является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 11.

Таблица 11 - Расчет бюджета затрат НТИ

| Наименование статьи | Сумма, руб. |
|---|--------------|
| 1. Расчет материальных затрат научного исследования | 1410 |
| 2. Затраты по основной заработной плате | 43409 |
| 3. Затраты по дополнительной заработной плате | 4815 |
| 4. Отчисления на социальные нужды | 13480 |
| 5. Накладные расходы | 17363 |
| Бюджет затрат НТИ | 80477 |

Выводы:

В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» были решены следующие задачи:

1. Проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования на примере SWOT-анализа, результат которого показал большой потенциал применения методики, а также возможность быстрого выхода на внутренний рынок обеспечены актуальностью данного исследования.

2. Определенна структура работ и количество исполнительней работы. Разработан календарный план-график для проведения НИР. Общее число работ составило 8. Определена трудоемкость проведения работ. Ожидаемая трудоемкость работ для научного руководителя составила 16 чел-дней, для студента-исполнителя составила 60 чел-дней. Общая максимальная длительность выполнения работы составила 114 календарных дней.

3. Определен бюджет НИР, который составил 80477 рублей

Следует отметить важность для проекта в целом проведенных в данной главе работ, которые позволили объективно оценить эффективность проводимого научно-технического исследования.

Следует отметить важность для проекта в целом проведенных в данной главе работ, которые позволили объективно оценить эффективность проводимого научно-технического исследования.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

| Группа | | | ФИО |
|--|--------------|---|--|
| 4НМ61 | | | Дятлов Александр Викторович |
| Институт | ИШНПТ | Кафедра | ВЭСЭ |
| Уровень образования | Магистратура | Направление/специальность | 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника |
| Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»: | | | |
| 1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения | | Объектом исследования является эффект Z-пинча. Исследования проводились в лаборатории ОВПЭ ИСЭ СО РАН на установке ИМРИ-5. Эффект Z-пинча может применяться в научных институтах и в исследовательских лабораториях, в которых проводятся прикладные исследования, по изучению эффекта сжатия плазмы собственным магнитным полем. | |
| Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке: | | | |
| 1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; – (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: – механические опасности (источники, средства защиты; – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты) | | Единственным вредным фактором при исследовании эффекта Z-пинча является электромагнитное излучение, производимое установкой, и сводящееся к нулю за счет экранирования. Опасными факторами являются: электрический ток и пожар. | |
| 2. Экологическая безопасность: – защита селитебной зоны; – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу | | В ходе выполнения экспериментов на установке ИМРИ-5, для исследования Z-пинч эффекта, не совершалось никаких вредных выбросов в атмосферу, гидросферу и литосферу. | |

| | |
|---|--|
| <p>(сбросы);</p> <ul style="list-style-type: none"> – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды | |
| <p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. | <p>Возможными чрезвычайными ситуациями в ходе экспериментов для исследования Z-пинч эффекта являются: затопление бункера горячей или холодной водой при авариях в сетях тепло- и водоснабжения, а также пожар. Наиболее типичной чрезвычайной ситуацией является пожар.</p> <p>Меры по предупреждению пожара:</p> <ul style="list-style-type: none"> - обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности; - соблюдение противопожарных правил; - своевременно проводить ТО и ППР электрических установок, - в электросетях должны устанавливаться аппараты защиты; - строго соблюдать требования приказа о противопожарном режиме; - исключить применение скруток для соединения электропроводов, кабеля; <p>При завершении работы (перед закрытием помещения):</p> <ul style="list-style-type: none"> - отключить все потребители электроэнергии; - убрать неиспользованные сменные материалы, отходы и горючий мусор из помещения; закрыть форточки на окнах. <p>При возникновении пожара, воспламенении горючих веществ работник лаборатории должен:</p> <ul style="list-style-type: none"> - без промедления сообщить об этом по телефону в пожарную охрану; - принять меры по вызову к месту пожара своего непосредственного руководителя или другого ответственного лица; |

| | |
|---|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> - покинуть зону воздействия опасных факторов пожара, воздействующих на организм человека, за пределы помещения или здания, в которых возник пожар; - отключить электрооборудование, электрические приборы, аппараты, стенды и электропитание в помещении, где возник пожар; - приступить к ликвидации пожара, используя первичные средства пожаротушения. |
| <p>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. | <p>Персонал, занятый работой на ИМРИ-5, относится к категории А, группа “а”. На него распространяется действие льгот:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 15% доплата к окладу, - дополнительный (до 18 рабочих дней) отпуск, - сокращенный на 1 час рабочий день. <p>Установка ИМРИ-5 может размещаться в лабораторном помещении, в котором должно быть предусмотрено холодное водоснабжение. Помещение должно снабжаться сигнализационным устройством, работающим с момента начала генерации и до ее окончания.</p> |

| | |
|---|--|
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику | |
|---|--|

Задание выдал консультант:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|--|-----------------------------|------------------------|---------|------|
| Профессор отделения контроля и диагностики ИШНКБ | Ахмеджанов Рафик Равильевич | д-р биол. наук | | |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|-----------------------------|---------|------|
| 4НМ61 | Дятлов Александр Викторович | | |

Глава 7. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Введение

Цель диссертационной работы заключается в создании новых технологий формирования плазменной оболочки Z-пинча и совершенствовании уже достигнутых преимуществ использования вакуумных дуговых разрядов при формировании лайнерных структур необходимой конфигурации и имеющих изначально высокую проводимость.

Исследование структуры образования и горения катодных пятен в условиях повышенных токов вакуумного дугового разряда (свыше 50 кА) в режиме коротких фронтов тока дуги (~ 1.5 мкс и менее) имеет очень важное значение из-за нарушения однородности горения катодных пятен и генерации плазмы. В условиях повышенных скоростей роста тока и плотности тока дугового разряда, одним из определяющих факторов может становиться скорость дрейфа магнитного поля в высокопроводящей среде плазменного потока. Поскольку времена самого процесса генерации плазмы становятся соизмеримыми с временем формирования структуры плазменного потока, то в этих условиях логично ожидать появления специфичных «трубчатых» структур за счет частичной экранировки внутренней поверхности катода проводящей средой самого плазменного факела. Актуальность результатов во многом определяется и оригинальностью новых подходов к исследованию процесса формирования плазменного потока с поверхности электродов, в условиях дугового разряда с повышенной плотностью тока, а именно рентгеновское теневое зондирование с разрешением по времени около 1 нс и с пространственным разрешением в несколько микрон. Эта диагностика широко используется более 10 лет в различных лабораториях мира, для производства высококачественных рентгеновских изображений с превосходными пространственными и временными разрешениями. Появление возможности использования столь мощного исследовательского инструмента позволит получить новые данные о плазменных объектах, диагностика которых другими методами затруднительна.

7.1. Производственная безопасность

Эксперименты проводились в лаборатории Отдела Высоких Плотностей Энергии в Сибирском Отделении Российской Академии Наук Института Сильноточной Электроники.

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, психофизиологические.

В таблице 12 представлены основные виды работ, которые могут привести к воздействию опасных и вредных факторов.

Таблица 12 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы.

Исследование физических процессов формирования интенсивных потоков плазмы на основе сильноточного вакуумного дугового разряда применительно к Z-пинчам

| Источник фактора, наименование видов работ | Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74) | | Нормативные документы |
|--|-------------------------------|---------------------|---|
| | Вредные | Опасные | |
| Работа на установке ИМРИ-5. Обработка результатов на ПЭВМ. | 1.Электромагнитное излучение | 1.Электрический ток | “ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность” “СанПиН 2.6.1.2573-10 Санитарные правила размещения и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ” “СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»” |
| | | 2.Пожар | ГОСТ Р 12.3.047-2012 ССБТ. Пожарная безопасность. |

7.1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения.

7.1.1.1. Электромагнитное излучение

Единственным вредным фактором при работе на установке ИМРИ-5 и ПЭВМ является электромагнитное излучение. Высокочастотный генератор производит электромагнитное излучение, которое сводится к нулю за счет экранирования.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля.

Вредное воздействие ЭМИ учитывает ГОСТ 24375-80 и государственные санитарные нормы и правила (№239) защиты населения от влияния электромагнитных излучений. Поглощение энергии в различных диапазонах биологическим объектом зависит от его формы и размеров, ориентации в электромагнитном поле, от длины волны, а также электрических свойств тканей.

Облучения электромагнитным полем большой интенсивности может привести к разрушительным изменениям в тканях и органах. При интенсивности 20 мкВт/см^2 наблюдается уменьшение частоты пульса, снижение артериального давления, повышение температуры тела, нервные расстройства. Мужские половые органы чрезвычайно сильно реагируют на облучение. Воздействие на них электромагнитного поля с плотностью выше 5 мВт/кв см может привести к бесплодию и мутациям генов, также замечены изменения в составе крови, условно-рефлекторной деятельности, клетках печени, коре головного мозга. При интенсивности 1 Вт/см^2 - потеря зрения. Тяжелые поражения возникают только в аварийных случаях и встречаются крайне редко.

Энергетическая экспозиция за рабочий день (рабочую смену) не должна превышать значений, указанных в таблицах 13 и 14. [23]

Таблица 13 - Предельно допустимые значения энергетической экспозиции

| Рабочий диапазон частот | Предельно допустимая энергетическая экспозиция | | |
|-------------------------|--|--|---|
| | По электрической составляющей, $(В/м)^2 \times ч$ | По магнитной составляющей, $(А/м)^2 \times ч$ | По плотности потока энергии $(мкВт/см^2) \times ч$ |
| 30 кГц - 3 МГц | 20000,0 | 200,0 | - |
| 3 - 30 МГц | 7000,0 | Не разработаны | - |
| 30 - 50 МГц | 800,0 | 0,72 | - |
| 50 - 300 МГц | 800,0 | Не разработаны | - |
| 300 МГц - 300 ГГц | - | - | 200,0 |

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкР/час. Конструкция ПЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

Таблица 14 - Временные допустимые уровни ЭМИ, создаваемых ПЭВМ

| Наименование параметров | | ВДУ ЭМИ |
|---|----------------------------------|---------|
| Напряженность электрического поля | в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц | 25 В/м |
| | в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц | 2,5 В/м |
| Плотность магнитного потока | в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц | 250 нТл |
| | в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц | 25 нТл |
| Электростатический потенциал экрана видеомонитора | 500 В | |

С превышением допустимых норм электромагнитного излучения необходимо применить средства и формы защиты персонала: уменьшение напряженности и плотности потока энергии путем использования согласованных нагрузок и поглотителей мощности; экранирование рабочего места; удаления рабочего места от источника электромагнитного излучения; рациональное размещение в рабочем помещении оборудования, излучающего энергию электромагнитного поля, применение предупреждающей сигнализации и средств индивидуальной защиты, установление рациональных режимов работ.

7.1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения

Опасными факторами при работе на установке ИМРИ-5 и ПЭВМ являются электрический ток и возможность пожара возникшего в результате образования электрического тока при выносе высокого напряжения на токопроводящие части конструкции.

7.1.2.1. Электрический ток

Электробезопасность – это система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества [24].

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ПЭВМ или другими электрическими приборами и установками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования.

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта электрических приборов;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заклучение в корпус токоведущих и электропоражающих частей) [24].

Электрозащитные средства – это переносимые и перевозимые изделия, служащие для защиты людей, работающих с электроустановками, от поражения электрическим током, от воздействия электрической дуги [24]. Эти средства должны обеспечивать высокую степень защиты и удобство при эксплуатации. В первую очередь безопасность обеспечивается применением средств коллективной защиты, а затем, если она не может быть обеспечена,

применяют средства индивидуальной защиты. К средствам индивидуальной защиты от поражения электрическим током относятся [24]:

- оградительные устройства, которые могут быть стационарными и переносимыми. Ограждения могут быть заблокированы с устройствами, отключающими рабочее напряжение при снятии;
- изолирующие устройства и покрытия;
- устройства защитного заземления, зануления и защитного отключения;
- устройства дистанционного управления;
- предохранительные устройства и др.

7.1.2.2. Пожар

Согласно нормам пожарной безопасности, в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д [25] [26]. Так как помещение лаборатории по степени пожароопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);

- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);

- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);

- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;

- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;

- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;

- правильное размещение оборудования;

- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

1. Сообщить руководству (дежурному);
2. Позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС – тел. 112;
3. Принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

7.2. Экологическая безопасность

7.2.1. Защита селитебной зоны

Селитебная территория - часть планировочной структуры города; территория включающая:

- жилые районы и микрорайоны;
- общественно-торговые центры, улицы, проезды, магистрали;
- объекты озеленения.

В селитебной зоне могут размещаться отдельные коммунальные и промышленных объекты, не требующие устройства санитарно-защитных зон

Для селитебной зоны крупных городов характерно наличие общегородского центра.

Промышленная зона городов должна быть в основном сосредоточена вблизи городских окраин или в нескольких километрах от города.

Город старается, избавиться от предприятий в центре, и расширить свою селитебную зону за счет застройки новыми жилыми комплексами.

Предприятия же в промышленных зонах городов получают удобные транспортные пути, лишенные городских пробок, маневренные парковки для большегрузных автомобилей, близость железнодорожных путей, аэропортов, а также большие площади земельных участков промзон, которые позволяют расти вширь предприятиям и складским комплексам, в городской черте, такая возможность логично исключалась.

Санитарно-защитная зона (СЗЗ) - это территория, отделяющая предприятия, их отдельные здания и сооружения с технологическими процессами, являющимися источниками воздействия на среду обитания и здоровье человека, от жилой застройки, ландшафтно-рекреационной зоны, зоны отдыха, курорта. Санитарно-защитная зона создается с целью защиты населения от влияния вредных производственных факторов (шум, пыль, газообразные и другие вредные выбросы, содержащие промышленные загрязнения).

Размер санитарно-защитной зоны (СЗЗ) может варьироваться от 50м до 1000м, в зависимости от принадлежности предприятия к определенному классу опасности.

В санитарно-защитной зоне не допускается размещать: жилую застройку, включая отдельные жилые дома, ландшафтно-рекреационные зоны, зоны отдыха, территории курортов, санаториев и домов отдыха, территорий садоводческих товариществ и коттеджной застройки, коллективных или индивидуальных дачных и садово-огородных участков, а также других территорий с нормируемыми показателями качества среды обитания; спортивные сооружения, детские площадки, образовательные и детские учреждения, лечебно-профилактические и оздоровительные учреждения общего пользования.

Допускается размещать в границах санитарно-защитной зоны промышленного объекта или производства здания и сооружения для обслуживания работников указанного объекта и для обеспечения деятельности промышленного объекта (производства).

Проектирование санитарно-защитных зон осуществляется на всех этапах разработки градостроительной документации, проектов строительства, реконструкции и эксплуатации отдельного промышленного объекта и производства и/или группы промышленных объектов и производств.

Размеры и границы санитарно-защитной зоны определяются в проекте санитарно-защитной зоны. Разработка проекта санитарно-защитной зоны для объектов I - III класса опасности является обязательной.

Временное сокращение объема производства не является основанием к пересмотру принятого размера санитарно-защитной зоны для максимальной проектной или фактически достигнутой мощности.

Граница санитарно-защитной зоны на графических материалах (генплан города, схема территориального планирования и др.) за пределами промышленной площадки обозначается специальными информационными знаками.

В проекте санитарно-защитной зоны должны быть определены:

- размер и границы санитарно-защитной зоны;
- мероприятия по защите населения от воздействия выбросов вредных химических примесей в атмосферный воздух и физического воздействия;
- функциональное зонирование территории санитарно-защитной зоны и режим ее использования.

Проектная документация должна представляться в объеме, позволяющем дать оценку соответствия проектных решений санитарным нормам и правилам.

Настоящий Федеральный закон устанавливает минимально необходимые требования к зданиям и сооружениям (в том числе к входящим в их состав сетям инженерно-технического обеспечения и системам инженерно-технического обеспечения), а также к связанным со зданиями и с сооружениями процессам проектирования (включая изыскания), строительства, монтажа, наладки, эксплуатации и утилизации (сноса), в том числе требования:

- 1) механической безопасности;
- 2) пожарной безопасности;
- 3) безопасности при опасных природных процессах и явлениях и (или) техногенных воздействиях;
- 4) безопасных для здоровья человека условий проживания и пребывания в зданиях и сооружениях;
- 5) безопасности для пользователей зданиями и сооружениями;
- 6) доступности зданий и сооружений для инвалидов и других групп населения с ограниченными возможностями передвижения;
- 7) энергетической эффективности зданий и сооружений;
- 8) безопасного уровня воздействия зданий и сооружений на окружающую среду.

7.2.2. Защита атмосферы

Для защиты атмосферы от негативного антропогенного воздействия используются следующие основные меры.

1. Экологизация технологических процессов:

- создание замкнутых технологических циклов, малоотходных технологий, исключающих попадание в атмосферу вредных веществ;
- уменьшение загрязнения от тепловых установок: централизованное теплоснабжение, предварительная очистка топлива от соединений серы, использование альтернативных источников энергии, переход на топливо повышенного качества (с угля на природный газ);
- уменьшение загрязнения от автотранспорта: использование электротранспорта, очистка выхлопных газов, использование каталитических нейтрализаторов для дожигания топлива, разработка водородного транспорта, перевод транспортных потоков за город.

2. Очистка технологических газовых выбросов от вредных примесей.

3. Рассеивание газовых выбросов в атмосфере. Рассеивание осуществляется с помощью высоких дымовых труб (высотой более 300 м). Это временное, вынужденное мероприятие, которое осуществляется вследствие того, что существующие очистные сооружения не обеспечивают полной очистки выбросов от вредных веществ.

4. Устройство санитарно-защитных зон, архитектурно-планировочные решения.

Санитарно-защитная зона (СЗЗ) – это полоса, отделяющая источники промышленного загрязнения от жилых или общественных зданий для защиты населения от влияния вредных факторов производства. Ширина СЗЗ

устанавливается в зависимости от класса производства, степени вредности и количества выделенных в атмосферу веществ (50–1000 м).

Архитектурно-планировочные решения – правильное взаимное размещение источников выбросов и населенных мест с учетом направления ветров, сооружение автомобильных дорог в обход населенных пунктов и др.

Оборудование для очистки выбросов:

- устройства для очистки газовых выбросов от аэрозолей (пыли, золы, сажи);
- устройства для очистки выбросов от газо- и парообразных примесей (NO , NO_2 , SO_2 , SO_3 и др.)

В ходе выполнения экспериментов на установке ИМРИ-5 не совершалось никаких вредных выбросов в атмосферу.

7.2.3. Защита гидросферы

Существуют несколько методов очистки воды, но все они входят в три группы методов:

- механические методы;
- физико-химические методы;
- биологические методы.

Наиболее дешевая - механическая очистка - применяется для выделения взвесей. Основные методы: процеживание, отстаивание и фильтрование. Применяются, как предварительные этапы.

Химическая очистка применяется для выделения из сточных вод растворимых неорганических примесей. При обработке сточных вод реагентами происходит их нейтрализация, выделение растворенных соединений, обесцвечивание и обеззараживание стоков.

Физико-химическая очистка применяется для очистки сточных вод от грубых мелкодисперсионных частиц, коллоидных примесей, растворённых соединений. Высокопроизводительный и в то же время дорогой способ очистки.

Биологические методы применяются для очистки от растворенных органических соединений. Метод основан на способности микроорганизмов разлагать растворенные органические соединения.

В настоящее время из общего количества сточных вод механической очистки подвергается 68% всех стоков, физико-химической 3%, биологической - 29%. В перспективе предполагается повысить долю очистки биологическим методом до 80%, что улучшит качество очищаемой воды.

Основным методом повышения качества очистки вредных выбросов предприятиями при рыночной экономике является система штрафов, а также система плат за пользование очистными сооружениями.

В ходе выполнения экспериментов на установке ИМРИ-5 не совершалось никаких вредных выбросов в гидросферу.

7.2.4. Защита литосферы

Утилизация твердых отходов

Утилизация представляет собой переработку отходов, имеющую целью использование полезных свойств отходов или их компонентов. В этом случае отходы выступают в качестве вторичного сырья.

По агрегатному состоянию отходы разделяются на твердые и жидкие; по источнику образования – на промышленные, образующиеся в процессе производства (металлический лом, стружка, пластмассы, зола и т.д.), биологические, образующиеся в сельском хозяйстве (птичий помет, отходы животноводства и растениеводства и др.), бытовые (в частности, осадки

коммунально-бытовых стоков), радиоактивные. Кроме того, отходы разделяются на горючие и негорючие, прессуемые и непрессуемые.

При сборе отходы должны разделяться по признакам, указанным выше, и в зависимости от дальнейшего использования, способа переработки, утилизации, захоронения.

После сбора отходы подвергаются переработке, утилизации и захоронению. Перерабатываются такие отходы, которые могут быть полезны. Переработка отходов – важнейший этап в обеспечении безопасности жизнедеятельности, способствующий защите окружающей среды от загрязнения и сохраняющий природные ресурсы.

Пластмассы в виде отходов естественным путем разлагаются медленно, либо вообще не разлагаются. При их сжигании атмосфера загрязняется ядовитыми веществами. Наиболее эффективными способами предотвращения загрязнения среды пластмассовыми отходами является их вторичная переработка (рециклинг) и разработка биodeградирующих полимерных материалов.

Широкое распространение получила термическая переработка отходов (пиролиз, плазмолиз, сжигание) с последующим использованием теплоты. Мусоросжигающие заводы должны оборудоваться высокоэффективными системами пыле- и газоочистки, так как существуют проблемы с образованием газообразных токсичных выбросов.

Отходы, не подлежащие переработке и дальнейшему использованию в качестве вторичных ресурсов, подвергаются захоронению на полигонах. Полигоны должны располагаться вдали от водоохраных зон и иметь санитарно-защитные зоны. В местах складирования выполняется гидроизоляция для исключения загрязнения грунтовых вод.

В ходе выполнения экспериментов на установке ИМРИ-5 не совершалось никаких вредных выбросов в литосферу.

7.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.

Факторы опасности:

- возможность поражения электрическим током;

Другие возможные виды аварий:

- Затопление бункера горячей или холодной водой при авариях в сетях тепло- и водоснабжения.
- Пожар

7.3.1. Поражение электрическим током

При поражении электрическим током следует необходимо освободить пострадавшего от действия электрического тока, обесточив установку с помощью главного рубильника, расположенного на распределительном щите, вызвать скорую помощь и, до её прибытия, оказать пострадавшему первую медицинскую помощь. При необходимости делать искусственное дыхание.

7.3.2. Затопление бункера горячей или холодной водой при авариях в сетях тепло- и водоснабжения.

2. Затопление комнаты горячей или холодной водой может произойти в результате разрушения тепло- и водоснабжения или протекания крыши.

Сотрудник, обнаруживший течь в рабочее время, обязан:

- отключить электроприборы;
- сообщить об аварии дежурному сантехнику по т.3-26 и главному энергетiku по т.3-16;

- сообщить руководителю подразделения по т.0-38, 49-27-69.
- персонал обязан принять участие в откачке и удалении воды.

7.3.3. Пожар

При возникновении пожара действовать согласно инструкции по пожарной безопасности.

Прежде всего, необходимо:

- обесточить установку;
- принять меры к устранению очага пожара;
- при необходимости надеть противогазы;
- при больших масштабах пожара вызвать дружину по т.3-43;
- оповестить о пожаре руководителя подразделения;
- при необходимости вызвать пожарную охрану по т.01.

Меры по предупреждению пожара

1. В период работы:

- своевременно проводить ТО и ППР эл. установок согласно утвержденного графика и технических средств противопожарной защиты и пожаротушения;
- на работе пользоваться только исправным электрооборудованием;
- в электросетях должны устанавливаться аппараты защиты;
- не применять запрещенные бытовые электронагревательные приборы;
- сварочные работы в помещениях проводить только по наряду-допуску
- строго соблюдать требования приказа о противопожарном режиме, особенно по курению и пользованию открытым огнем;

- не прокладывать кабель (эл.провод) без наличия сертификата, а также по горючим конструкциям помещения с нарушениями требований ПУЭ;

- при отсутствии проекта и положительном заключении Госпожнадзора, не приступать к строительным работам (реконструкции, ремонту и перепланировке и т. п.) в помещении;

- исключить применение скруток для соединения электропроводов, кабеля;

- проверять исправность и соответствие устройств защиты техническим требованиям ПУЭ и другие меры.

2. При завершении работы (перед закрытием помещения):

- отключить все потребители электроэнергии;

- убрать неиспользованные сменные материалы, отходы и горючий мусор из помещения; закрыть форточки на окнах.

- убедиться внешним осмотром в отсутствии ЛВЖ и ГЖ, запаха дыма (гари) и утечки воды из системы отопления;

- проверить наличие на местах средств пожаротушения;

- закрыть дверь на ключ, положив его в отведенную ячейку;

сдать помещение охраннику под охранно-пожарную сигнализацию под роспись.

В случае аварии на установке необходимо немедленно отключить питание и убедившись в снятии напряжения с накопителя, сообщить руководителю работ.

В случае пожара сообщить по т.01 и приступить к его ликвидации, приняв меры максимального оповещения о нем.

Во всех случаях аварии, если есть пострадавшие, сообщить о них по т.03 и оказать первую медицинскую помощь.

7.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

7.4.1. Специальные правовые нормы трудового законодательства

Согласно ТК РФ, N 197 -ФЗ каждый работник имеет право на [27]:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;
- получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;
- личное участие или участие через своих представителей в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий труда на его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания;

- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;

- гарантии и компенсации, установленные в соответствии с настоящим Кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на работах с вредными и (или) опасными условиями труда.

- повышенные или дополнительные гарантии и компенсации за работу на работах с вредными и (или) опасными условиями труда могут устанавливаться коллективным договором, локальным нормативным актом с учетом финансово-экономического положения работодателя.

Персонал, занятый работой на ИМРИ-5, относится к категории А, группа “а” [28]. На него распространяется действие льгот:

- 15% доплата к окладу,
- дополнительный (до 18 рабочих дней) отпуск,
- сокращенный на 1 час рабочий день.

7.4.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации.

Установка ИМРИ-5 может размещаться в лабораторном помещении, в котором должно быть предусмотрено холодное водоснабжение. Помещение должно снабжаться сигнализационным устройством, работающим с момента начала генерации и до ее окончания.

При монтаже установки должны быть обеспечены свободные проходы не менее 1 метра к пульту управления, щиткам. Площадь, занимаемая оборудованием, не должна превышать 50% общей площади помещения. Между частями установки и стенами должны быть проходы не менее 0,8м.

Пульт управления установки должен размещаться в отдельном помещении (пультовой).

Помещение должно быть оборудовано общеобменной вентиляцией с кратностью воздухообмена 10.

Дверь в помещение должна быть оборудована блокировкой.

Все нетоковедущие металлические части установки и приборы должны быть надежно заземлены.

Монтаж электрооборудования должен производиться при полном снятии напряжения и заземленных токоведущих частях. [29]

На рабочем месте должны быть следующие защитные средства:

- | | |
|-------------------------------------|-----------|
| • Разрядная штанга | 1 шт., |
| • Указатель напряжения до 1000 В | 1 шт., |
| • Диэлектрические перчатки | 1 пара, |
| • Диэлектрический коврик | 1 шт., |
| • Электроинструмент с изол. ручками | 1 компл., |
| • Плакаты и знаки безопасности | 1 шт., |
| • Огнетушитель | 1 шт. |

То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, рис. 24.

– в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъемно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора 80 будет составлять 30°.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

– по высоте + 3 см;

– по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;

– в левом и правом направлениях. Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является ее размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°.

Заключение по разделу

В разделе социальная ответственность были проанализированы и выявлены вредные факторы производственной среды, изучен перечень возможных чрезвычайных ситуации, а также разработаны действия в результате возникновения ЧС и меры по ликвидации её последствий.

Заключение

Проведенные исследования показали, что в случае использования плазменной пушки с обратным токопроводом (см. Рис. 16 и 19) образуется стержнеобразная плазменная струя. Вследствие того, что ток дуги протекает как в радиальном направлении, так и вдоль оси плазменной струи, возникающее вокруг него магнитное поле также имеет как радиальную составляющую B_r , так и составляющую B_z вдоль оси Z . Сила $J \times B_z$ действующая на движущиеся ионы вызывает пинч-эффект, сжимая плазменную струю по направлению к её оси аналогично тому, как описано в модели [20].

Если на пути плазменной струи вблизи дугового катода имеется коллиматор, ток дуги полностью шунтируется внутри коллиматора, тем самым разрушая стержневидную структуру плазменной струи. Плазменный поток беспрепятственно проходит через отверстие в торцевой части обратного токопровода не меняя своей структуры. Обнаруженные особенности формирования плазменной струи позволят формировать плазменные структуры необходимой для сильноточных генераторов формы.

Обработка данных по рентгеновской радиографии плазменной струи показывает, что скорость распространения условного фронта вещества плазменной струи с линейной массой 2-5 мкг/см составляет около 1.2 см/мкс.

Библиографический список

- [1] T. A. Shelkovenko, S. A. Pikuz, and D. A. Hammer, “A review of projection radiography of plasma and biological objects in X-pinch radiation”, Plasma Phys. Reports, V. 42, Issue 3, pp. 226–268, 2016.
- [2] J. D. Douglass, S. A. Pikuz, T. A. Shelkovenko, D. A. Hammer, S. N. Bland, S. C. Bott, and R. D. McBride, “Structure of the dense cores and ablation plasmas in the initiation phase of tungsten wire-array Z-pinches”, Phys. Plasmas, 14, 9, 2007.
- [3] D. Kalantar and D. Hammer, “The x-pinch as a point source of x rays for backlighting”, Rev. Sci. Instrum., 66, 779, 1995.
- [4] S. A. Pikuz, T. A. Shelkovenko, V. M. Romanova, D. A. Hammer, A. Y. Faenov, V. A. Dyakin, and T. A. Pikuz, “High-luminosity monochromatic x-ray backlighting using an incoherent plasma source to study extremely dense plasmas”, Rev. Sci. Instrum., 68, p. 740, 1997.
- [5] T. A. Shelkovenko, S. A. Pikuz, A. R. Mingaleev, and D. A. Hammer, "Studies of plasma formation from exploding wires and multiwire arrays using x-ray backlighting", Rev. Sci. Instrum., 70, pp. 667-670, 1999.
- [6] D. B. Sinars, T. A. Shelkovenko, S. A. Pikuz, J. B. Greenly, and D. A. Hammer, “Exploding aluminum wire expansion rate with 1-4.5 kA per wire”, Phys. Plasmas, 7, pp. 1555-1563, 2000.
- [7] S. A. Pikuz, D. B. Sinars, T. A. Shelkovenko, K. M. Chandler, D. A. Hammer, G. V. Ivanenkov, W. Stepniewski, and I. Y. Skobelev, “High energy density z-pinch plasma conditions with picosecond time resolution”, Phys. Rev. Lett., 89, 035003, 2002.
- [8] S. V. Lebedev, F. N. Beg, S. N. Bland, J. P. Chittenden, A. E. Dangor, M. G. Haines, K. H. Kwek, S. A. Pikuz, and T. A. Shelkovenko, “Effect of discrete

wires on the implosion dynamics of wire array Z-pinches”, Phys. Plasmas, 8, 3734, 2001.

[9] V. Alexandrov, I. Frolov, M. Fedulov, E. Grabovsky, K. Mitrofanov, S. Nedoseev, G. Oleinik, I. Porofeev, A. Samokhin, P. Sasorov *et al.*, “Prolonged plasma production at current-driven implosion of wire arrays on Angara-5-1 facility”, IEEE Trans. Plasma Sci., 30, 559, 2002.

[10] E. V. Grabovski, K. N. Mitrofanov, G. M. Oleinik, and I. Y. Porofeev, “X-ray backlighting of the periphery of an imploding multiwire array in the angara-5-1 facility”, Plasma Phys. Rep., 30, pp. 121-127, 2004.

[11] S. V. Lebedev, F. N. Beg, S. N. Bland, J. P. Chittenden, A. E. Dangor, M. G. Haines, M. Zakaullah, S. A. Pikuz, T. A. Shelkovenko, and D. A. Hammer, “X-ray backlighting of wire array Z-pinch implosions using X-pinch”, Rev. Sci. Instrum., 72, pp. 671-673, 2001.

[12] B. M. Song, S. A. Pikuz, T. A. Shelkovenko, and D. A. Hammer, “Determination of the size and structure of the X-pinch X-ray source from the diffraction pattern produced by microfabricated slits”, Appl. Opt., 44, pp. 2349-2358, 2005.

[13] B.M. Kovalchuk, A.A. Kim, E.V. Kumpjak, N.V. Zoi, J.P. Corley, K.W. Struve, D.L. Johnson, В сборнике: PPPS 2001 – Pulsed Power Plasma Science 2001 PPPS–2001 Pulsed Power Plasma Science 2001. 28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference, 2001. C. 1739-1742.

[14] Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. Справочник по физике. Для инженеров и студентов ВУЗов. Издание четвертое, переработанное. Наука. М. 1968 г.

[15] A. P. Artyomov, A. V. Fedyunin, S. A. Chaikovsky, A. S. Zhigalin, V. I. Oreshkin, N. A. Ratakhin, and A. G. Roussikh, “A double-frame

nanosecond soft X-ray backlighting system based on X-pinches”, Instrum. Exp. Tech., Vol. 56, No. 1, pp. 66–71, 2013.

[16] A. G. Russkikh, A. V. Shishlov, A. S. Zhigalin, V. I. Oreshkin, S. A. Chaikovaskii and R. B. Baksht, “Small-sized vacuum-arc-discharge x-ray radiograph”, Plasma Sources Sci. Technol., 20, 035011, 2011.

[17] A. G. Rousskikh, A. S. Zhigalin, V. I. Oreshkin, S. A. Chaikovsky, N. A. Labetskaya, A. V. Batrakov, G. Yu. Yushkov, and R.B.Baksht “Study of the stability of Z-pinch implosions with different initial density profiles”, Physics of Plasmas, 21, 052701, 2014.

[18] A. G. Rousskikh, A. S. Zhigalin, V. I. Oreshkin, V. Frolova, A. L. Velikovich, G. Yu. Yushkov, and R.B.Baksht, “Effect of the axial magnetic field on a metallic gas-puff pinch implosion”, Physics of Plasmas, 23, 063502, 2016.

[19] A. Anders, G. Yu. Yushkov, “Ion flux from vacuum arc cathode spots in the absence and presence of magnetic field”, Journal of Applied Physics, Vol. 91, No. 8, pp. 4824-4832, 2002.

[20] A. Anders, G. Yu. Yushkov, “Angularly resolved measurements of ion energy of vacuum arc plasmas”, Applied Physics Letters, Vol. 80, No. 14, pp. 2457-2459, 2002.

[21] Anders A., Oks E.M., Yushkov G.Yu. et al. // IEEE Tansaction on plasma science, Vol. 33, No.5, 2005.

[22] S. I. Braginsky, “On the behavior of a completely ionized plasma in a strong magnetic field”, Sov. Phys. JETP, 33, p. 645, 1957.

[23]. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».

[24]. ГОСТ 12.1.038 – 82 ССБТ. Электробезопасность.

[25]. ГОСТ Р 12.3.047-2012 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля

[26]. ППБ 01 – 03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.

[27]. ТК РФ, N 197 –ФЗ Трудовой Кодекс Российской Федерации.

[28]. ОСП -72/87 Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений.

[29]. СанПиН 2.6.1.2573-10 Санитарные правила размещения и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ.

Приложение А

Студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|-----------------------------|---------|------|
| 4НМ61 | Дятлов Александр Викторович | | |

Консультант кафедры ИЯФТИ:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|------------------------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент | Парнюгин Александр Сергеевич | канд. пед. наук | | |

Консультант – лингвист кафедры ВЭСЭ :

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------------|----------------------------|---------------------------|---------|------|
| ассистент кафедры ВЭСЭ | Карнаухова Анна Алексеевна | к.ф.-м.-н | | |

INTRODUCTION

Metal-puff Z-pinches (based on vacuum arc discharge systems) [1]–[3] are currently used along with wire array and gas-puff Z-pinches. The advantages of metal puff Z-pinches are significant initial conductivity ($\sim 10^4 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ [2]), and hence no “cold start” problem, reusability, and suppression of Rayleigh–Taylor instabilities [2]. Of critical importance are the initial conditions of the operation of a metal puff, namely its radial and axial mass distributions. The most informative method for examination of dense plasma flows is X-pinch radiography, which provides a spatial resolution of about $10 \mu\text{m}$ at a time resolution of about 1 ns . These diagnostics has been widely used in various laboratories of the world for more than 10 years to obtain high quality x-ray radiography images with high space and time resolution [4]–[5]. When, combined with a step wedge made of the same material as the test plasma, these diagnostics allows not only qualitative but also quantitative analysis of the plasma flow structure. The main aim of the study was to determine the linear mass distribution in the plasma jet for plasma jet systems of different geometry.

EXPERIMENTAL EQUIPMENT AND PROCEDURE

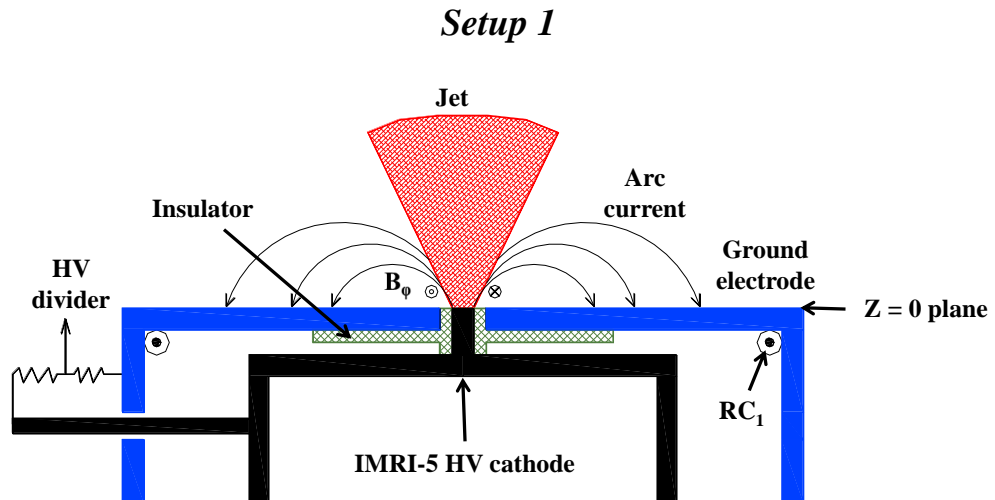


Fig. 1. Experimental setup 1. RC_1 is a Rogowski coil.

The experiment was carried out on the IMRI-5 generator (450 kA, 450 ns in short-circuit operation). The load of the IMRI-5 generator was a plasma gun. The

production of the gun plasma was initiated by a vacuum arc [1], [3]. Experimental setup 1 is sketched in Fig. 1. The rod cathode of the plasma gun was made of aluminum. The diameter of the Al cathode was 3 mm unless otherwise stated. The width of the polyethylene insulator mounted between the cathode and the anode was 0.25 cm.

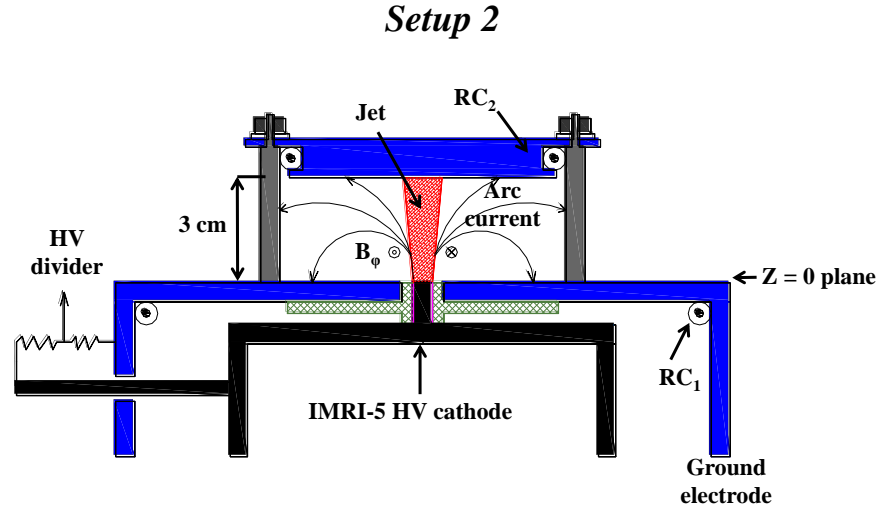


Fig. 2. Experimental setup 2. RC_1 and RC_2 are Rogowski coils.

The second version of the experimental arrangement, Setup 2, was different from Setup 1 only by the presence of a return conductor around the plasma jet (Fig. 2). The return conductor was fabricated as four stainless-steel posts of diameter 1 cm arranged in a circle of diameter 6 cm. The conductor end part was a stainless-steel flat flange with a cavity intended for placing a Rogowski coil. The distance between the plasma gun and the top plate was 3 cm.

Diagnostics

Throughout the experiment, the total current of the IMRI-5 generator was measured with a 1040-turn Rogowski coil (RC_1) loaded with a shunt of resistance $r_{sh1} = 0.196 \, \Omega$. The arc voltage drop was measured with a high-voltage divider whose upper and lower arm resistance was 2 k Ω and 1 Ω , respectively. The current portion carried by the plasma jet was measured with a 218-turn Rogowski coil (RC_2) loaded with a shunt of resistance $r_{sh2} = 0.198 \, \Omega$.

In addition to measuring the electrical and physical parameters of the arc,

radiography of the plasma flow structure and imaging of the luminous plasma jet were performed.

The plasma jet images were taken with a 4-frame HSCF Pro optical camera at an exposure time of 3 ns and a frame interval of 40 ns. The material distribution in the plasma jet was examined using a compact X-pinch generator. An XPG compact current generator (250 kA, 220 ns) [2] loaded with an X-pinch system was used as a source of soft x-ray radiation for the radiograph. The X-pinch load consisted of four Mo wires of diameter 25 μm . An essential feature of this radiograph is that the XPG generator is connected to the IMRI-5 current generator with a flexible current transmission line. The transmission line is 1.2 m long and consists of 82 coaxial cables, each 3 mm in diameter. The total wave resistance of the transmission line is 0.61 Ω and its electric length is 6 ns. This engineering solution allowed us to connect the XPG unit with the vacuum chamber incorporating the X-pinch system to the IMRI-5 generator.

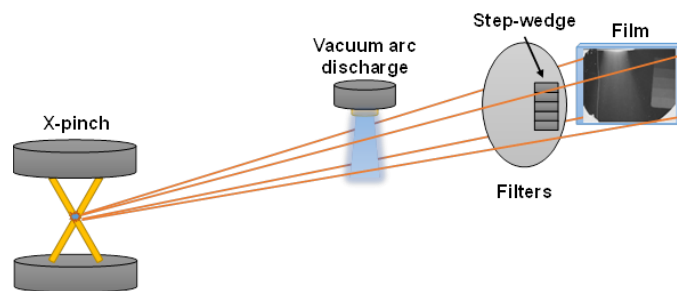


Fig. 3. Sketch of the soft x-ray radiography ($h\nu \approx 1\text{--}2\text{ keV}$) of a plasma jet formed by a high-current vacuum arc.

The experimental arrangement providing for twofold soft x-ray radiography magnification of a plasma jet is presented in Fig. 3. The plasma images were recorded on Micrat-ORTO film. To protect the film from exposure to the arc visible radiation, 4- μm Kimfol + 0.4- μm Al filters were used. In the experiment, we recorded simultaneously two x-ray radiography images: one of the plasma jet and the other of the step wedge (see Fig. 4). The step wedge made of the same

material as the plasma jet was used to determine the linear mass of the jet. It was deposited on the surface of a polypropylene filter (6 μm); the Al steps were of thicknesses 0.25, 0.5, 0.75, 1, and 1.25 μm .

The X-pinch current was measured with a Rogowski coil. The X-pinch x-ray radiation was detected with a PCD diamond detector (Alameda Applied Sciences Corporation) placed downstream of a 5- μm aluminum foil filter. The distance from the X-pinch to the PCD was 30 cm. The PCD sensitivity in the quantum energy range $h\nu = 100 \text{ eV} - 5 \text{ keV}$ was $5.5 \cdot 10^{-4} \text{ A/W}$. The time delay of the start of the XPG relative to the start of the IMRI-5 could be varied, and it was predetermined with an external drive-pulse generator (DPG).

It is well known that the optical density D of a material is proportional to the intensity I of the radiation transmitted through the material layer of thickness h :

$$D \propto I \propto I_0 \cdot e^{-\mu \cdot \rho \cdot h}, \quad (1)$$

where ρ and μ are the material density and absorption coefficient, respectively. For the points at which the optical density of the plasma, D_{pl} , is equal to that of the step wedge layer, D_{sw} , we can write the equation

$$\rho_{pl} \cdot h_{pl} = \rho_{sw} \cdot h_{sw}, \quad (2)$$

where h_{pl} and ρ_{pl} are the thickness of the absorption layer and the average plasma layer density, respectively; h_{sw} and ρ_{sw} are the step wedge layer thickness and density, respectively.

The film on which the radiation was incident having passed through the plasma and the step wedge with the same surface density had the same optical density. The obtained x-ray radiography image of the step wedge allowed a mathematical formulation of the direct relationship between the quantity $\rho_{sw} \cdot h_{sw}$ and the film optical density D_{film} with a polynomial:

$$\rho \cdot h(D_{film}) = a \cdot D_{film}^2 + b \cdot D_{film} + c, \quad (3)$$

where the coefficients a , b , and c depend on the x-ray intensity and spectrum. Therefore, these coefficients should be determined for every image. Equation (3) is

a simple polynomial which describes discrete values of the film optical density D_{film} located behind a step wedge using an elementary parabolic function.

It is obvious that the material absorption coefficient for probe radiation depends on the radiation spectrum. As the emission spectrum of the X-pinch was not monochromatic, the film optical density D_{film} was an integral characteristic of the radiation flux transmitted either through the plasma under examination or through the step wedge. To estimate the density and linear mass of the plasma flow, we compared (for each shot) the optical density of the film in the plasma region and in the region of the step wedge rather than used its absolute values. Therefore, we could use formula (4) below for both monochromatic and nonmonochromatic probe radiation.

The optical density distribution $D_{film}(r)$ across the plasma jet radiography image was determined in several cross-sections. The thickness of each cross-section corresponded to 33 pixels (about 0.1 mm) of the image. The distributions $D_{film}(r)$ obtained for different distances from the arc cathode were used to investigate the variation in the arc plasma linear mass.

In the experiment, the distance from the x-ray source to the test plasma jet was much greater than the jet diameter. Therefore, we could roughly considered the radiation incident on the test object to be flat and the depth of the layer absorbing the radiation at any point of the plasma jet radius to be equal to the chord length at this point.

The linear mass of each plasma layer was calculated by integrating the product of the surface plasma density and the depth of the radiation absorbing layer over the radius:

$$m_p = 2 \int_0^R \rho \cdot h(r) dr. \quad (4)$$

The radial distribution of the quantity $h_{pl} \cdot \rho_{pl}$ for each cross-section was constructed by using formula (3).

EXPERIMENTAL RESULTS

We investigated the structure of the plasma flow produced by a plasma gun in two different experimental arrangements (Setup 1, 2, see Fig. 1, 2) with the use of an x-ray radiograph loaded with an X-pinch system. The plasma gun current was in range of 300-350 kA and the current rise time of 500 ns.

Typical waveforms of the XPG and IMRI-5 generator currents and of the PCD signal are given in Fig. 4.

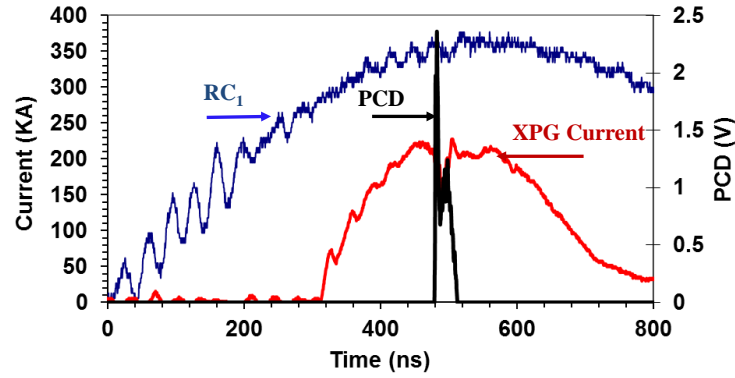


Fig. 4. Setup 1. Waveforms of the RC_1 and XPG currents and of the PCD signal.

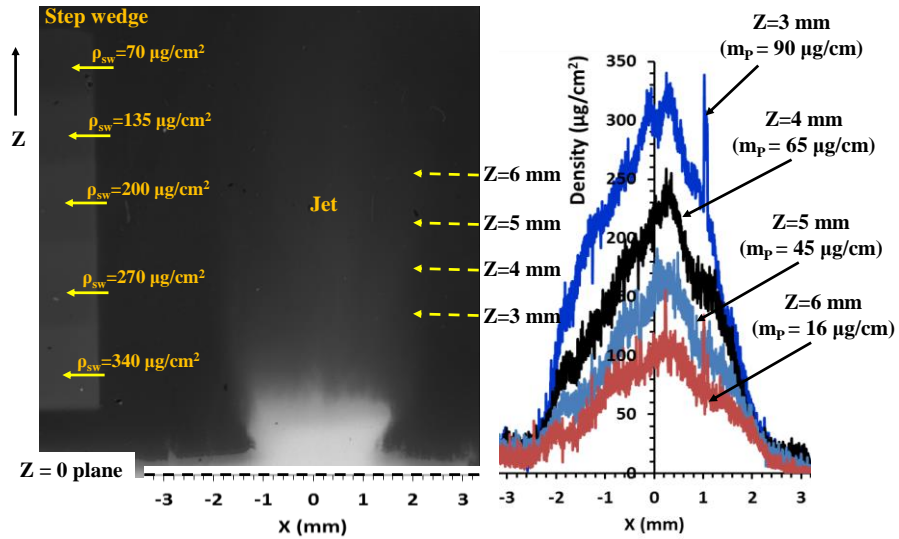


Fig. 5. Setup 1. X-ray radiography image of a plasma jet (Setup 1) taken at $t_{\text{reg}} = 540$ ns after the onset of the IMRI-5 current. The positions marked with $Z = 3 - 6$ mm are the locations of the cross-sections where the plasma surface density and linear mass were evaluated.

Figure 5 presents an X-ray radiography of the plasma jet produced in Setup 1 that was taken at $t_{reg} = 540$ ns after the onset of the IMRI-5 generator current. In the same figure, the curves of the radiographic density in four different cross-sections scaled to surface plasma density units are shown. The integrated surface densities corresponding to the plasma linear mass in the cross-sections marked with $Z = 3 - 6$ mm are given in brackets. The symbol Z denotes the distance from the cathode to a given imaging plane along the plasma jet axis. The imaging planes were spaced by 1 mm. The values of Z were taken from the confidence interval corresponding to the surface density range $20-340 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ for the step wedge.

As can be seen from Fig. 5, the plasma jet was appreciably divergent. The cathode material evaporated uniformly from the entire surface. The densest portion of the plasma (with a linear mass greater than $90 \mu\text{g}/\text{cm}$) was located at a distance of 3 mm from the cathode surface. For this case, it was impossible to estimate the plasma surface density and linear mass at nearer distances, as the linear mass of the plasma was greater than that of the thickest step of the wedge.

For our case, with a significant arc current rise rate ($\sim 0.7 \text{ kA}/\text{ns}$), it was supposed that the moving plasma should capture some portion of the arc current due to the presence of the return conductor, and this should affect the structure of the emerging plasma flow. To verify this supposition, we performed several shots in which the plasma gun was enclosed in a post-type return conductor with a solid stainless-steel plate on its top end (Setup 2, see Fig. 2).

Typical images of plasma jets taken in their self-irradiation with a 4-frame HSCF Pro optical camera in shots performed on Setup 2 are given in Fig. 6. The arc cathode was an aluminum rod with diameter 5 mm. The visible image of the plasma jet is a column whose minimal diameter is 4 mm and height is 3 cm. As can clearly be seen in Fig. 6, the plasma jet is not expanding but, on the contrary, constricting during its propagation along the system axis.

A plasma column of this type may exist only if a significant portion of the arc current flows along the plasma jet. Part of the arc current is carried away by the moving plasma, and the magnetic pressure of this current prevents the plasma from expanding. Figure 7 shows typical (for Setup 2) waveforms of the arc current (measured with Rogowski coil RC_1), the current reaching the top flange (measured with Rogowski coil RC_2), and the HV divider signal. In these shots, the cathode diameter was 5 mm.

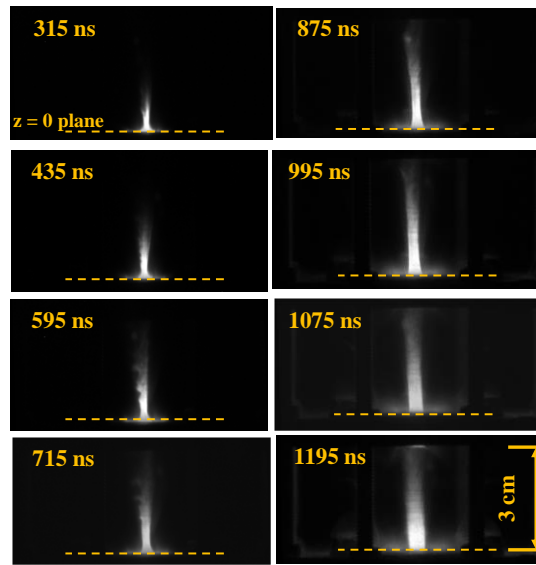


Fig. 6. Images of an Al plasma jet taken in its self-radiation with a 4-frame HSCF Pro optical camera.

The time zero in Fig. 6 is the same as time zero in Fig. 7. As can be seen from Fig. 7, the RC_2 signals start in synchronism with the RC_1 signals, indicating that the current aligned with the system axis starts flowing immediately as plasma occurs. The absence of a delay between the RC_1 and RC_2 currents suggests that the RC_2 current rise time is determined by the emissive properties of the plasma rather than results from the acceleration of the radially expanding plasma under the action of the electromagnetic forces of the current it carries. It should also be noted that the RC_2 signal in the short-circuit mode is of the same polarity as those in the shots performed with the plasma gun throughout the measurement time interval. This also suggests no dynamic motion of the current leading edge in the location region of the RC_2 . The plasma jet images taken at different times (see Fig. 6) also indicate

that a confined plasma jet starts forming immediately at the onset of current flow through the arc. The images given in Fig. 6 show that the plasma column retains its structure within 1195 ns, even though the RC_1 current in the main circuit approaches zero. This confirms the supposition that the RC_2 current is significant.

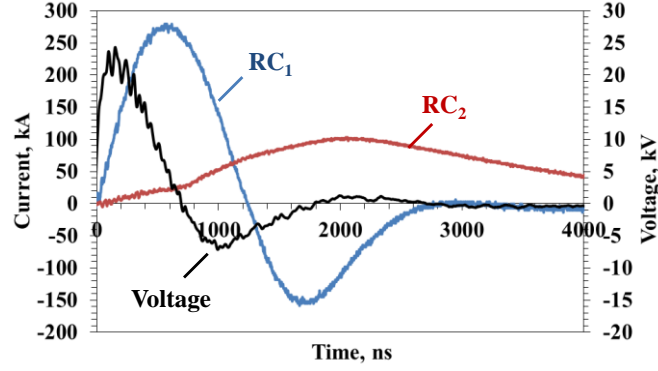


Fig. 7. Waveforms of the RC_1 arc current, the RC_2 current reaching the upper flange, and the HV divider signal. The arc cathode diameter was 5 mm.

As we have a plasma column with a slightly varying diameter, the material propagates under conditions close to Bennett equilibrium, such that the magnetic pressure $P_{B\phi}$ is approximately equal to the thermal pressure:

$$P_{B\phi} = N_i \cdot (1 + \bar{Z}) \cdot k \cdot T. \quad (5)$$

Here N_i is the ion concentration in the plasma jet, \bar{Z} is the mean ion charge, T is the plasma temperature, and k is Boltzmann's constant. It was shown [4] that for any current density distribution in a plasma jet, the Bennett equilibrium condition written in CGS units has the form:

$$k \cdot T = \frac{I^2}{2 \cdot c^2 \cdot N_i \cdot (1 + \bar{Z})}, \quad (6)$$

where I is the current through the plasma jet, N_i is the number of ions per unit length in the plasma jet, and c is the velocity of light in vacuum.

The mean charge of aluminum ions in an electric arc is typically equal to 1.7 [3] and the electron temperature is about 3 eV [3], [5]. As can be deduced from

Fig. 5, in our case, the plasma linear mass varies over the column length in the range 10–30 $\mu\text{g}/\text{cm}$, which corresponds to $N_i = (0.2\text{--}0.6) \cdot 10^{18}$ aluminum ions per centimeter. Hence, the current I necessary for a Bennett equilibrium to occur should be 22–38 kA, which is in good agreement with the current measured with Rogowski coil RC₂.

A plasma expanding in vacuum is subject to two main forces: a thermal pressure gradient and a Lorentz force $\mathbf{F} \sim \mathbf{I} \times \mathbf{B}$, where \mathbf{B} is the magnetic induction vector. In our case, the arc current flows both in radial direction and along the plasma jet axis; that is, the current vector has a radial (I_r) and an axial component (I_z), whereas the magnetic induction vector has only an azimuthal component (B_ϕ). Accordingly, the Lorentz force has both a radial and an axial component. The axial component $F_z \sim I_r \cdot B_\phi$ accelerates the plasma in the direction from the cathode to the top flange of the return conductor. The radial component $F_r \sim I_z \cdot B_\phi$ compresses the plasma jet toward its axis, as described in the model [6], giving rise to a pinch effect.

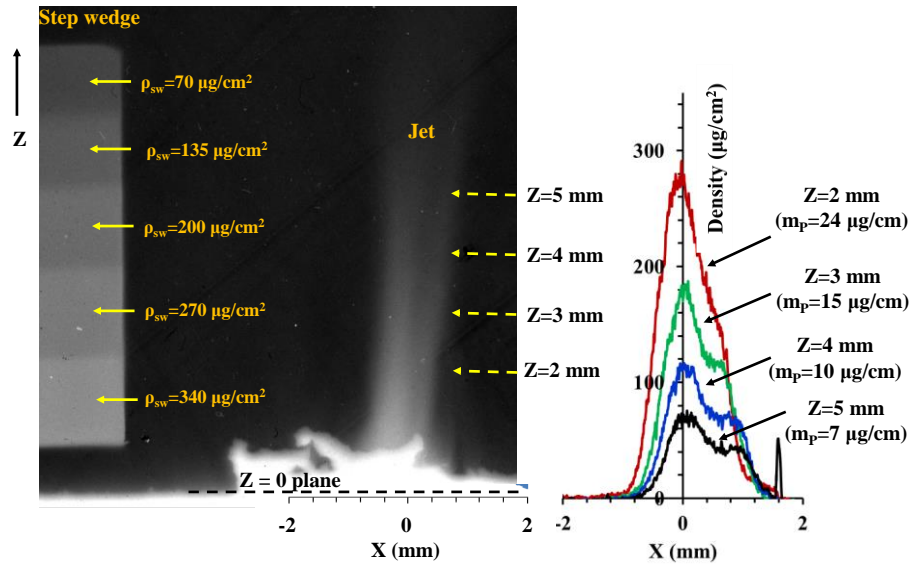


Fig. 8. X-ray radiography image of a plasma jet (Setup 2) taken at $t_{\text{reg}} = 483$ ns after the onset of the IMRI-5 current. The positions marked with $Z = 2 - 5$ mm are the locations of the cross-sections where the plasma density and linear mass were evaluated.

To validate the observation of a confined plasma flow, we examined the plasma jets with an x-ray radiograph. For these shots, an aluminum cathode of diameter 3 mm was used. Figure 8 presents an x-ray radiography image of a plasma jet taken at the 483th nanosecond after the onset of the IMTI-5 current (Setup 2, see Fig. 2).

In the shots with a plasma jet enclosed in the return conductor, we observed the formation of a confined plasma flow. It should be noted that the plasma jet decreased in diameter even during the formation of cathode spots on the cathode surface (with the 3-mm diameter cathode, the initial diameter of the plasma column was 1.9 mm).

Figure 9 presents plots of the dependence of the plasma jet linear mass on the distance from the cathode (given in numerical form in Figs. 5 and 8). The data points represent the linear masses evaluated using x-ray radiography, and the dashed lines show a linear interpolation of the experimental data. The z-intercepts correspond to the locations of a conditional front of the moving plasma. Knowing the coordinate and the imaging time, we can estimate the velocity of motion of the conditional front. The plasma propagation velocity estimated in this way is 1.4 cm/ μ s for both Setup 1 and Setup 2 and does not depend (or depends slightly) on the presence or absence of a return conductor around the plasma jet. It should be noted that the estimates of the plasma propagation velocity are in good agreement with the measurements of the velocities of aluminum ions in vacuum arcs reported in [3].

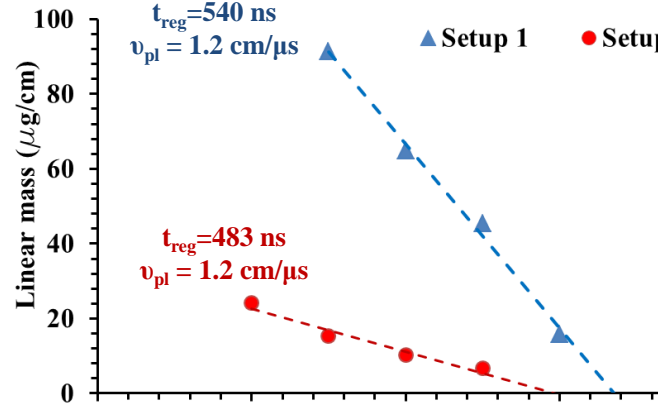


Fig. 9. Values of the linear mass of a plasma jet at different distances from the cathode evaluated for Setup 1 (at the 540th ns after the onset of the IMRI-5 current) and Setup 2 (at the 483th ns after the onset of the IMRI-5 current).

The experimentally revealed fact that the plasma expansion velocity depends weakly on the presence or absence of a return conductor around the plasma jet indicates that the axial component of the Lorentz force, F_z , was nearly the same for both experimental arrangements. At the same time, the passage of a relatively low current through the return conductor in Setup 2 increased the radial component of the Lorentz force, F_r , causing an appreciable self-pinching of the plasma flow.

CONCLUSION

The experiment has shown that in the case of a plasma gun with return current posts (see Figs. 2 and 3), a pinch effect arises that provides for the formation of a confined plasma jet. The pinch effect is due to that a portion of the arc current is flowing along the plasma jet.

The propagation velocity of the plasma jet is about $1.4 \text{ cm}/\mu\text{s}$. It does not depend (or depends slightly) on the presence or absence of a return conductor around the plasma jet. At the same time, the presence of a return conductor results in an appreciable self-pinching of the plasma flow.

REFERENCES

- [1] A. G. Rousskikh, A. S. Zhigalin, V. I. Oreshkin, S. A. Chaikovsky, N. A. Labetskaya, A. V. Batrakov, G. Yu. Yushkov, and R. B. Baksht, “[Study of the stability of Z-pinch implosions with different initial density profiles](#)”, [Phys. Plasmas](#), 21, 052701, 2014.
- [2] A. P. Artyomov, A. V. Fedyunin, S. A. Chaikovsky, A. S. Zhigalin, V. I. Oreshkin, N. A. Ratakhin, and A. G. Rousskikh, “A double-frame nanosecond soft X-ray backlighting system based on X-pinches”, [Instrum. Exp. Tech.](#), Vol. 56, No. 1, pp. 66–71, 2013.
- [3] A. Anders and G. Yu. Yushkov, “Ion flux from vacuum arc cathode spots in the absence and presence of magnetic field”, [J. Appl. Phys.](#), Vol. 91, No. 8, pp. 4824–4832, 2002.
- [4] S. I. Braginsky, “On the behavior of a completely ionized plasma in a strong magnetic field”, [Sov. Phys. JETP](#), **33**, p. 645, 1957.
- [5] A. G. Rousskikh, V. I. Oreshkin, A. S. Zhigalin, and G. Yu. Yushkov, “Determination of plasma parameters with a probing magnetic field pulse”, [Tech. Phys. Lett.](#), Vol. 42, No. 3, pp. 223–226, 2016.
- [6] D. G. Colombant and B. V. Weber, “A Simple Model for Flashboard Plasma Expansion”, [IEEE Trans. Plasma Sci.](#), Vol. PS-15, NO. 6, p. 741, 1987.